



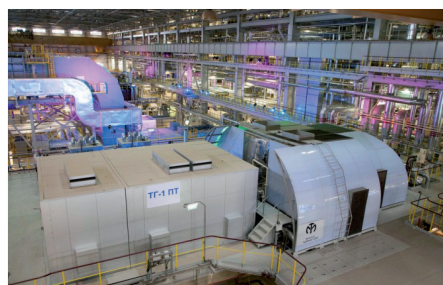
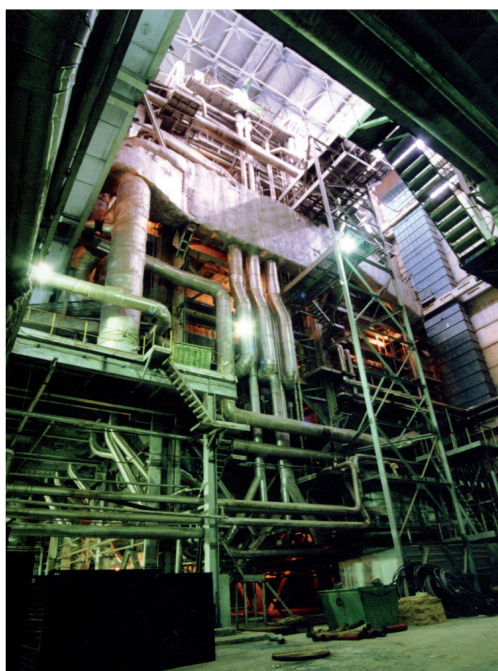
Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Уральский  
энергетический  
институт

# РАЗВИТИЕ ТОПОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИЙСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Учебное пособие







Министерство образования и науки Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

# **РАЗВИТИЕ ТОПОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИЙСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
для студентов бакалавриата, магистратуры и аспирантуры,  
обучающихся по направлениям подготовки:  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,  
13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,  
13.06.01 «Электро- и теплотехника»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2016

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.26я73

P17

Авторы: В. Л. Шульман, А. Ф. Рыжков, Т. Ф. Богатова, В. А. Микула,  
Е. И. Левин, П. В. Осипов

Рецензенты: директор филиала «Свердловский» *В. А. Бусоргин* (ПАО  
«Т Плюс»);

зам. директора предприятия «УралОРГРЭС» канд. техн. наук *А. В. Зайцев*

Научный редактор — проф., д-р техн. наук *Б. В. Берг*

**Развитие топочных технологий в российской энергетике** : учеб-  
ное пособие / В. Л. Шульман [и др.]. — Екатеринбург : Изд-во  
Урал. ун-та, 2016. — 504 с.  
ISBN 978-5-7996-1823-0

В учебном пособии излагаются вопросы разработки, совершенствования и перспектив развития топочных технологий и оборудования. Проанализировано влияние характеристик топлива на конструктивные и технологические решения. Рассмотрены вопросы повышения технико-экономических и экологических показателей при модернизации котельного оборудования.

Учебное пособие может быть использовано для подготовки студентов бакалавриата, магистратуры и аспирантуры, обучающихся по направлениям подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.06.01 «Электро- и теплотехника».

УДК 621.313(075.8)

ББК 31.26я73

ISBN 978-5-7996-1823-0

©Уральский федеральный  
университет, 2016

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

**Р**азвитие отечественной котельной техники всегда характеризовалось глубоким теоретическим анализом соответствующих явлений и их закономерностей. Это направление было сохранено и развито и в дальнейшем, причем глубокой научной разработке были подвергнуты все основные стороны рабочего процесса котла. Российских ученых, начиная с И. И. Ползунова (1728–1766 гг.), изобретателя паровой машины, а также парового котла с автоматическим регулированием питания, всегда отличала глубокая теоретическая проработка и оригинальные практические решения самых сложных вопросов развития котельной техники.

Цели настоящего издания:

- проследить динамику непрерывного развития топочных технологий, научно-технического, технологического и аппаратурного обеспечения этого развития, выделить мотивы и направленность новых разработок, показать возможность прогнозирования и актуализации направлений развития и дальнейшего совершенствования топочного процесса в энергетических котлах;
- способствовать развитию творческого инженерного мышления молодых специалистов для преодоления сложившегося в настоящее время в отечественной энергетике отставания от мировой энергетики в разработке и освоении современных и перспективных топочных технологий.

В непростых современных условиях делом профессиональной чести молодых российских инженеров, научно-технических кадров является непрерывность творческого поиска, выполнение самых передовых, перспективных разработок в топочной технике, не ограниченное переложением иностранных технологий (как это зачастую делается сейчас). Необходимо создавать и выводить на мировой рынок отечественную конкурентоспособную научно-техническую продукцию, на практике доказывая состоятельность нашего научно-технического сообщества как преемника традиций российской и советской энергетики как составной части мировой инженерии.

Исходя из последней задачи, авторы не ограничились детальным описанием современной топочной техники в энергетике, но рассмотрели ее в различных временных срезах, охватывающих весь период развития отечественной энергетики, и связи его с процессами в мировой энергетике. Это позволит наглядно убедиться в непрерывности направленного развития топочной технологии как условия развития отрасли, в последовательном формировании научно-технической и методической базы совершенствования процессов и оборудования для сжигания широкого спектра энергетических углей, утверждать значимость инженерного творчества, развивать творческое мышление современных студентов-теплоэнергетиков.

Помимо этих аспектов важно обратить внимание и на другую сторону инженерного творчества — представленные материалы позволяют ощутить эстетическое совершенство многих научных и инженерных разработок, красоту и изящество решений сложных практических задач.

Такой подход в изложении материала представляется актуальным в наш век информационных технологий, при неограниченной доступности огромного массива информации без структурированного анализа. В результате формируется, к сожалению, фрагментарность восприятия научных, технических знаний, свойственная значительной части современных молодых специалистов. Каждый бит, каждый пакет информации, достаточный для решения конкретной сиюминутной задачи, не сопрягается с пониманием логики, внутренней мотивации поисков, усилий, борьбы идей, ошибок и великих достижений в развитии топочной техники. Эта система узкой полосы информационного обеспечения по систе-

ме «запрос — ответ» не способна научить человека творческому, созидательному мышлению. Поэтому важно стимулировать понимание развития технологий как непрерывный процесс, опирающийся на предшествующий отечественный и мировой опыт и требующий соучастия широкого круга специалистов-энергетиков, формировать у студентов профессиональный кругозор, глубокое понимание логики и перспектив развития сложного энергетического оборудования.

---

# **1. ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ БАЗЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПОЧНОЙ ТЕХНИКИ В МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

---

---

## **1.1. Развитие методов сжигания энергетического топлива в энергетике как непрерывный процесс**

---

**Н**а всем протяжении развития энергетики при совершенствовании систем сжигания энергетического топлива имело место сочетание эмпирических и научно обоснованных подходов. Подходы, основанные на строгих теоретических представлениях, становились все более востребованными в связи с ростом единичной мощности отдельных горелочных устройств и топков, расширением спектра используемых топлив. По мере формирования основ теории горения складывалась возможность направленного конструктивного и режимного воздействия в создании новых топочно-горелочных устройств с уверенно предсказуемыми характеристиками. Понимание физико-химических, аэродинамических механизмов процесса горения становилось неременным условием эффективности прак-

тической инженерной деятельности, работы конструктора, исследователя, наладчика. При этом значимость практического опыта всегда была чрезвычайно высока.

По словам нашего замечательного ученого, лауреата Нобелевской премии, академика Н. Н. Семенова, человек практически использует горение в течение десятков тысяч лет, а электричество — немногим более одного столетия. Однако законы, определяющие условия использования и преобразования электричества, изучены более глубоко, чем законы, определяющие горение. Эта, казалось бы, парадоксальная ситуация определяется сложностью процессов горения, в которых одновременно протекают разветвленные химические реакции, диффузионные, тепло- и массообменные процессы.

Научные исследования горения начались в XVI в. и постепенно углублялись в течение последующих пяти веков. От поколения к поколению ученых — физиков и химиков — передавалась эстафета все большего постижения столь очевидного и загадочного процесса преобразования вещества и энергии [1; 2].

— Ф. Бэкон (1561–1626 гг.) — занимался изучением свойств теплоты.

— Р. Бойль (1627–1691 гг.) — отвергал философские толкования пламени как элемента, придерживался теории флогистона, утверждавшей наличие в каждом горючем материале субстанции флогистон — носителя теплоты, выделяемого при горении. Сформулировал закон изменения объема воздуха с изменением давления (1662 г.), позднее подтвержденный Э. Мариоттом (1676 г.).

— А. Лавуазье (1743–1794 гг.) — создатель кислородной теории горения, считал, что при горении происходит присоединение к телу части атмосферного воздуха — кислорода, опроверг теорию флогистона; показал, что вода есть соединение кислорода и водорода, а не элемент; синтезировал воду из этих газов (1785 г.), определил теплоту сгорания веществ с помощью созданного им калориметра. Своей деятельностью он, по существу, совершил научную революцию, но стал жертвой другой революции — Великой французской — на гильотине.

— М. Ломоносов (1711–1765 гг.) — сформулировал принцип сохранения материи: «Все изменения, совершающиеся в природе, происходят таким образом, что сколько к чему прибавилось, столько же отнимется от другого. Этот закон природы является настолько всеобщим, что простирается и на правила движения: тело, побуждающее толч-



ком к движению другое, столько же теряет своего движения, сколько отдает от себя это движение»; сформулировал кинетическую теорию теплоты в «Размышлениях о причине теплоты и холода» (1744 г.); доказывал, что причиной теплоты «являются внутренние вращательные движения материи» [3], под которой имелись в виду некие неосязаемые частицы — молекулы. По существу, М. Ломоносов изложил начала термодинамики.

— А. Вольта (1745–1827 гг.) — предвестник эпохи электричества, объяснил природу постоянного тока в гальванических элементах, создал химические источники электрического тока; при этом причастен и к расширению знаний о природе процесса горения — исследовал горение «болотного газа», создал газовую горелку для его сжигания.

— К. Бертолле (1748–1822 гг.) — единомышленник А. Лавуазье, создал теорию химического равновесия; он рассматривал химическую реакцию как непрерывный и необратимый процесс. Получил «бертолетову соль» — один из сильнейших окислителей, используемых для получения взрывчатых веществ.

— Дж. Дальтон (1766–1844 гг.) — создал ряд основополагающих химических законов: закон парциального давления газов, закон кратных отношений (в соединении двух элементов отношение количества массы их — простые целые числа); он считал химическую реакцию связанными друг с другом процессами соединения и разъединения атомов, ввел понятие атомной массы.

— С. Карно (1796–1832 гг.) — создал ключевые положения термодинамики [4]:

- *о природе тепла* — тепло не что иное, как движущая сила, или вернее, движение, изменившее свой вид, это движение частиц тела; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, пропорциональном количеству исчезнувшей силы. Обратно, при исчезновении тепла возникает движущая сила;
- *о законе сохранения энергии* — движущая сила существует в природе в неизменном количестве, она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается, она меняет форму, вызывает то один вид движения, то другой, но никогда не исчезает;
- *эквивалент тепловой и механической энергии* — определил численное значение этого эквивалента, позднее несколько уточненное;

- *метод исследования тепловых машин* — круговые термодинамические процессы преобразования в тепловых машинах — замкнутые циклы;
- *положения второго закона термодинамики* — недостаточно создать теплоту, чтобы создать движущую силу, нужно еще добыть холод, без него теплота стала бы бесполезной. Повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы.

— М. Фарадей (1791–1867 гг.) — создал представление о существовании электромагнитных полей (1832 г.), осуществил сжижение газа — хлора (1824 г.), установил законы электролиза.

— Г. Гесс (1802–1850 гг.) — установил закон постоянства сумм тепла в термохимическом процессе [5]: каким бы путем ни совершалось соединение веществ, шло ли оно непосредственно или косвенным путем в несколько приемов, количество выделившегося при его образовании тепла всегда постоянно. Таков основной закон термохимии — тепловой эффект реакции определяется лишь начальным и конечным состоянием химической системы и не зависит от ее промежуточных состояний.

— Б. Клапейрон (1799–1864 гг.) — ввел в термодинамику графическое выражение состояния газа в координатах  $p$ - $v$ , установил уравнение состояния идеального газа;

— Р. Клаузиус (1822–1888 гг.) — много сделал для утверждения второго закона термодинамики, для обратимых термодинамических процессов установил математическое выражение  $Q_1/Q_2 = T_1/T_2$  и далее установил, что для кругового процесса, когда рабочее тело возвращается в исходное состояние, изменение энтропии равно нулю.

— У. Томпсон (лорд Уильям Кельвин) (1824–1907 гг.) — сформулировал второе начало термодинамики («в природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, совершенная за счет охлаждения теплового резервуара»). Ввел понятие абсолютной температуры и абсолютной шкалы температур (шкала Кельвина), выдвинул теорию строения атомов (1902 г.), рассчитал размер молекулы.

— А. Ле Шателье (1850–1936 гг.) — создатель принципа химического равновесия системы — принципа Ле Шателье (химически равновесная система, на которую оказывается воздействие, смещает равновесие так, чтобы уменьшить влияние этого воздействия — добавление в рав-

новесную систему одного из реагирующих веществ приводит к увеличению его расходования в прямой реакции). Впервые использовал фотосъемку для исследования распространения пламени.

— Д. И. Менделеев (1834–1907 гг.) — создатель периодической системы элементов (1869 г.), занимался вопросами развития топливобывающих отраслей — угле- и нефтедобычи, рационального использования топлив («уголь как топливо, нефть как сырье»); высказал идею подземной газификации угля, использования протяженных газопроводов. Ввел понятие «абсолютной температуры кипения» (критическая температура, при которой плотности жидкости и пара данного вещества совпадают, отсутствует фазовый переход). Корректировал уравнение состояния идеального газа (уравнение Клайперона — Менделеева) [6].

— С. Аррениус (1859–1927 гг.) — разработал теорию электролитической диссоциации (распад молекулы в растворе на положительный и отрицательный фрагменты — ионы, которые направляются к противоположно заряженным электродам). Ввел понятие энергии активации  $E$  — энергетического барьера, который необходимо преодолеть для развития реакции, т. е. затраты энергии на разрушение атомарных связей в реагирующих молекулах. Предложил важнейшее уравнение химической кинетики — уравнение Аррениуса (экспоненциальная температурная зависимость скорости химической реакции  $k = k_0 e^{-E/RT}$ ).

— В. А. Михельсон (1860–1927 гг.) — выдающийся российский ученый, первый исследователь, разработавший теорию скорости горения в струе газа, исследовал нормальную скорость распространения пламени, установил зависимость скорости распространения фронта воспламенения от состава горючей газовой смеси; заложил основы теории взрывного горения [7].

В XX в. с опорой на такой огромный научный задел трудами многих выдающихся западных и отечественных ученых, крупных научных коллективов были сформулированы основные положения теории горения. Расширению масштабов исследований способствовали специфические условия горения в новых системах сжигания органического топлива — двигателях внутреннего сгорания, дизельных установках, авиационных двигателях, ракетных установках, камерах сгорания газовых турбин, мощных топочных устройствах энергетических котлов. Сжигание дисперсных пылевоздушных и газожидкостных топлив, горение при значительном разрежении и повышенном давлении

нии, пульсационное горение, сжигание смеси различных топлив, переход от слоевого сжигания твердого топлива к сжиганию его в потоке, форсированные топочные устройства с высоким теплонапряжением объема, принципиально новые экологические требования по ограничению вредных выбросов, образующихся в факеле, — все это многообразие проблем требовало новых подходов, разработки качественно новых аспектов науки о горении.

В XX в. за рубежом существенно активизировались непосредственные контакты между учеными, эффективно использовались различные каналы информационного обмена, широкого обсуждения новых идей, проводились совместные исследования в ведущих научных лабораториях, складывались интернациональные научные школы. Наиболее значительные успехи были достигнуты в Германии, Великобритании, США.

— М. Планк (1858–1947 гг.) — выдающийся ученый-физик, создатель квантовой теории, занимался в начале научной карьеры проблемами термодинамики [8], теоретически обосновал невозможность передачи теплоты от холодного к горячему источнику.

— Т. фон Карман (1881–1963 гг.) — американский инженер и исследователь, проводил теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных проблем аэродинамики (пограничный слой, турбулентность), термодинамики; его работы в этих направлениях являются классикой и базой для конструктивных решений и расчетов современных энергетических агрегатов.

— В. Иост — выполнил полный обзор и системный анализ основных экспериментальных и теоретических работ по вопросам горения и взрывов в газах [9].

— С. Н. Хиншельвуд (1897–1967 гг.) — выдающийся английский физик, химик, один из создателей учения о цепном механизме воспламенения и горения, устанавливающего, что реакция протекает по разветвленным многочисленным промежуточным реакциям, при этом конечная скорость реакции по цепному механизму протекает неизмеримо быстрее скорости прямой молекулярной реакции [10]. Лауреат Нобелевской премии вместе с Н. Н. Семеновым (1956 г.).

— Д. Сполдинг — внес решающий вклад в создание моделей турбулентности и теплопередачи [11].

— Х. Хоттел — выдающийся специалист в области горения, исследовал основные стадии горения твердого топлива, смешение и горе-

ние в турбулентных газовых струях, границы ламинарного и турбулентного режимов горения [12].

И. Пригожин (1917–2003 гг.) — выдающийся ученый XX в., бельгийский и американский физик и химик, лауреат Нобелевской премии (1977 г.). Показал существование неравновесных термодинамических систем, которые, поглощая вещество и энергию из окружающей среды, могут совершать качественный скачок к усложнению структуры [13; 14].

В зарубежной и отечественной научной литературе широко публикуются и цитируются работы таких авторитетных зарубежных специалистов, как Д. Таунсенд, Б. Льюис, Д. Эльбе, Дж. Кинан, Р. Хейвуд [15–17].

## **1.2. Формирование и развитие научной базы роста и совершенствования топочной техники в отечественной энергетике**

---

Формирование целостной научной базы развития топочной техники происходило в нашей стране в сложных условиях, в столкновении различных научных школ. Значительная часть ведущих специалистов в области теории горения (Ю. Б. Харитон, Я. Б. Зельдович, К. И. Щелкин, В. Н. Франк-Каменецкий) были привлечены к реализации атомного проекта и работали в закрытых научных центрах. Тем не менее, отечественные ученые и инженеры-энергетики смогли обеспечивать развитие нашей отрасли на высоком уровне.

При всей ограниченности кадровых и материальных возможностей начальный этап развития отечественной энергетике потребовал продвижения широким фронтом системного подхода в планировании электрификации страны. Уже при формировании первой целостной программы развития энергетики страны — плана ГОЭЛРО — стала очевидной необходимость соблюдения целого ряда условий:

- развитие топливной базы энергетики, в первую очередь с использованием местных топлив (торф, древесина);
- создание собственного энергомашиностроения, необходимой технологической базы;
- подготовка инженерно-технических кадров — проектантов, наладчиков, эксплуатационников;

– формирование и развитие научно-технической базы для роста и совершенствования отечественной энергетики.

Разветвленная школа отечественных исследователей, участвовавших в формировании основных положений современной теории горения в XX в., охарактеризована одним из ее участников, Г. Ф. Кнорре. Приводим его оценки с некоторыми уточнениями:

1. Институт химической физики Академии наук СССР во главе с Н. Н. Семеновым (1896–1986 гг.), Я. Б. Зельдовичем (1914–1987 гг.), Д. А. Франк-Каменецким (1910–1970 гг.), В. Н. Кондратьевым (1902–1979 гг.), которые заложили *основы цепной и тепловой теории гомогенных процессов горения* [18; 19]. Установлено, что горение есть цепь последовательных реакций взаимодействия исходных реагирующих веществ с активными промежуточными продуктами горения, большей частью свободными атомами и радикалами (осколками молекул, утративших в ходе реакций отдельные атомы). Эти короткоживущие, крайне неустойчивые частицы, обладающие повышенной химической активностью, образуют новые молекулы, отрывая часть необходимых атомов у молекулы исходного вещества. При этом реакция горения приобретает цепной характер и продолжается до обрыва цепи вследствие исчезновения активных частиц, когда будет исчерпано в горящем объеме все исходное топливо.

2. А. Б. Налбандян, Н. М. Эмануэль определили роль промежуточных продуктов газовых реакций, в частности, свободных гидроксидов, природу активных центров.

3. Сотрудниками Института химической физики во главе с Д. А. Франк-Каменецким исследована роль процессов диффузии и теплопередачи в процессе воспламенения и горения, установлен цепной характер реакции превращения атмосферного азота при горении газозвоздушной смеси.

4. Я. Б. Зельдович выявил закономерности образования так называемых «тепловых» или «воздушных» оксидов азота в результате окисления азота воздуха при высоких температурах — «механизм Зельдовича» [20; 21].

5. Институт физики Московского государственного университета, а также Энергетический институт Академии наук имени Г. М. Кржижановского и Всесоюзный теплотехнический институт имени Ф. Э. Дзержинского во главе с Д. Н. Хитриным (1907–1965 гг.) и сотрудниками О. П. Цухановым, Х. И. Колодцевым разработали наиболее система-



тизированные представления о гетерогенных процессах *горения и газификации твердого углерода*. В разработку этих проблем внесли вклад наши ведущие ученые — Б. В. Канторович (процессы газообразования в слое, воспламенение угольной пыли в потоке, горение угольной пыли под давлением), Л. И. Хитрин (условия воспламенения и горения угольной пыли), В. И. Бабий (поведение отдельных пылеугольных частиц в факеле — воспламенение, выгорание, теплообмен, перемещение в факеле).

6. Центральный котлотурбинный институт им. И. И. Ползунова, кафедра теплофизики Ленинградского политехнического института, кафедра теплотехники Ленинградского технологического института имени Ленсовета — Г. Ф. Кнорре (1891–1962 гг.), В. В. Померанцев (1906–1984 гг.), Д. Н. Ляховский, Л. А. Вулис, Б. Д. Кацнельсон, И. И. Палеев (1901–1970 гг.), С. Л. Шагалова и др. провели *исследования механизма горения природных топлив, аэродинамики горелочных устройств*.

7. З. Ф. Чуханов (1912–1986 гг.) выполнил обширный объем *работ по газификации топлив, их энерготехнологическому использованию, разрабатывал методы скоростного пиролиза угля*.

8. *Фундаментальные исследования теоретической и практической газодинамики поточных топочных процессов*, включая газодинамический расчет турбулентного газового факела, проведены Г. Н. Абрамовичем (1911–1995 гг.). На основе трудов большой группы отечественных и зарубежных специалистов разработаны способы интенсификации и управления процессом горения; созданы инженерные методы расчета факела. Скорость реакции принимается бесконечно большой; исходя из приоритета явлений переноса вещества, энергии полагается обоснованным расчет факела на основе соотношений, установленных в теории струй. Таким образом, теория турбулентной струи послужила основой для изучения структуры факела (поля скоростей, температуры, концентрации) и основных его параметров (устойчивость, стабилизация, срыв). Классическая теория струй (Г. Н. Абрамович, Л. Прандтль) может использоваться также при выборе основных геометрических параметров топки.

9. Развитие аэродинамической теории прямоструйного газового факела получило развитие в работах Л. А. Вулиса, Л. П. Ярина, выполнивших исследования аэродинамики прямоструйных и вихревых газовых пламен. В результате этих исследований устанавлива-



ется обоснованность оценки топки как струйного аппарата, в котором в восходящий поток топочных газов вводятся поперечные потоки прямоточных или закрученных струй из горелок. Здесь в топочном объеме развиваются процессы турбулентного массопереноса, позволяющие завершить процессы смешения топлива с воздухом, осуществлять рециркуляцию топочных газов к корню факела и его стабилизацию, обеспечить выравнивание состава и температуры топочных газов по сечению топки.

10. Б. В. Раушенбах (1915–2001 гг.) работал в области ракетостроения, разработал теорию вибрационного горения.

11. Лидеры отечественной *школы физического моделирования топочных процессов* — М. В. Кирпичев (1879–1955 гг.), А. А. Гухман, М. А. Михеев создали теорию и методологию моделирования процессов и топочных устройств, широко используемых в научной и инженерной практике. Уже в 1986 г. Я. Б. Зельдович в одном из последних опубликованных материалов подчеркнул важность методов математического моделирования для расчета топочных процессов и топочных устройств, большей математизации в изучении и анализе этих процессов. Значительны работы Л. А. Вулиса, Б. П. Устименко (огневое моделирование топок), С. С. Кутателадзе (1914–1986 гг.) (аэродинамическое моделирование).

12. М. А. Стырикович (1902–1995 гг.) разрабатывал методику теплового и аэродинамического расчета котельных агрегатов, пропагандировал использование газовых турбин для надстройки паровых котлов в производственных котельных и на паротурбинных ТЭЦ.

13. Широкомасштабные исследования процессов формирования кипящего слоя и сжигания в нем органических топлив, проведенные уральской научной школой (Н. И. Сыромятников (1914–1987 гг.), А. П. Баскаков (1928–2015 гг.)), выдвинули отечественные разработки на передовые позиции в мировых исследованиях этой проблемы.

14. Ведущие ученые разрабатывали научные и учебные материалы по термодинамике, проблемам горения, обобщающие итоги развития науки на каждом историческом этапе — А. Ф. Иоффе [22], В. А. Кириллин [23], Л. А. Вулис [24].

15. Опыт развития нашей энергетики, и в частности в разработках топочных технологий, показывает последовательное совершенствование методических принципов развития:

— от эмпирического к научному способу решения проблем;

- от изолированного решения отдельных задач к комплексному, системному подходу;
- от лабораторного и натурного моделирования к современным методам математического моделирования;
- от решения локальных задач к непрерывному совершенствованию и развитию топочной техники;
- от решения возникающих проблем к упреждающему решению прогнозируемых проблем, к работе на опережение;
- от частных разработок новых технологических решений к максимальной интеграции опыта специализированных научных, инженерно-технических центров, эксплуатационного персонала.

Усилиями Г. Ф. Кнорре и его сотрудников (В. В. Померанцев, Л. А. Вулис, Д. Н. Ляховский), а также прямых учеников лидера советской физики А. Ф. Иоффе — Н. Н. Семенова (МГУ, ЛПИ), П. Л. Капицы (МГУ), И. И. Палеева (ЛПИ) — к 1940 г. сформировалась инженерно-техническая школа специалистов в области топочной техники, обеспечивающая непосредственную связь научных и инженерных кадров, подготовку высококвалифицированных специалистов, теоретиков и практиков. Значительны работы по ряду направлений, выполняемые отраслевыми организациями — ВТИ, ЭНИН, СибВТИ, УралВТИ, ВНИИМТ. К настоящему времени ведущим научным центром в стране в области теории и технологии сжигания энергетического топлива является Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. Активные научные школы функционируют в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, Уральском, Дальневосточном, Сибирском федеральных университетах, Новосибирском государственном техническом университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, в Национальном исследовательском университете «МЭИ» (Московском энергетическом институте).

### **1.3. Итоги развития отечественной топочной технологии и техники**

---

На протяжении трех-четырёх десятилетий первой половины XX в. отечественными специалистами были проведены фундаментальные научные исследования по горению, газодинамике, массообмену, фи-

зико-химическим процессам в пылеугольном и газовом факеле. Отечественная наука обеспечила возможность комплексного решения проблемных задач совершенствования топочной технологии — направленного формирования оптимальной структуры факела и конструкции топочно-горелочных устройств на стадии расчетов, проектирования, наладки.

Формирование мощной научной базы создания, исследования топочно-горелочных устройств, высокий профессионализм и подвижнический труд инженеров-практиков, талантливых руководителей создали условия для решительного прорыва в развитии нашей энергетики в 50–60-х гг. XX в., занявшей ведущие позиции в мировой энергетике за счет:

- создания топочных устройств для мощных котлоагрегатов на уровне лучших мировых образцов;
- разработки широкого спектра горелочных устройств;
- эффективного энергетического использования низкокачественных углей, не применяемых в зарубежной энергетике, — высокозольных экибастузских углей, сланцев;
- мощных темпов энергетического строительства.

Однако развитие научно-технической, инженерно-конструкторской базы технологий и оборудования для сжигания энергетического топлива нельзя представить некой непрерывно восходящей траекторией. Наряду с серьезными достижениями, определившими высокий уровень советской энергетики, имели место амбициозные, широко рекламируемые проекты, не подтвердившие свою эффективность. Приведем несколько примеров.

1. Высокотемпературное сжигание топлива с получением плазмы для МГД-генератора (магнитогидродинамический генератор), руководитель — крупнейший отечественный специалист в области теплофизики и энергетики акад. А. Е. Шейншлин. Предусматривалось прямое преобразование продуктов сжигания в виде плазмы в электрический ток. Были выделены огромные средства, созданы уникальные экспериментальные установки У-25, но в конце концов проект был закрыт.

2. Газификация мазута на ТЭС, руководитель проекта — выдающийся ученый с широкой сферой научных интересов от сверхзвуковой авиации до использования мазута на ТЭС, академик С. А. Христианович. Предполагалось сжигать в топке энергетического котла продукты газификации мазута (в том числе, высокосернистого). Для этого был

сооружен на ТЭЦ в г. Дзержинске цех газификации мазута (1980 г.). Завершить наладку установки газификации не удалось, ее пришлось демонтировать.

3. Высоконапорный парогенератор ПГУ — над ним работала большая группа научных работников и инженеров ЦКТИ, ВТИ, машиностроительных заводов (1960—1980 гг.). Сжигание газового топлива осуществляется под давлением, создаваемым компрессорным воздухом ГТУ, в цилиндрическом экранированном толстостенном сосуде. В 1972 г. на Невинномысской ГРЭС создана ПГУ с высоконапорным парогенератором мощностью 200 МВт. Преимущества подобной схемы ПГУ на практике не подтвердились. Работы в этом направлении в России и за рубежом в значительной мере свернуты.

4. В 1993 г. планировался пуск котла БКЗ-420-КС со стационарным кипящим слоем (Барнаульская ТЭЦ-3). Реконструкция котлов с переводом на сжигание в кипящем слое, осуществленная предприятиями самостоятельно, а также с помощью ведущих энергетических институтов (ВТИ, НПО ЦКТИ, КазНИИ энергетики и др.), Бийского и Барнаульского котельных заводов, включая и энергетические котлы БКЗ-220-КС, БКЗ-420-КС, оказалась неэффективной. В то же время в энергетике развитых стран топки КС имеют широкое распространение, но там традиционно поставляется сортированный уголь. По условиям устойчивости КС к фракционному и техническому составу топлива предъявляются жесткие и практически трудновыполнимые требования. Работа топок сопровождалась большим выносом топлива из собственно слоя, высокими потерями (до 15—20 %) горючих в уносе, резким падением высоты и стабильности работы кипящего слоя.

Причины неудач таких внешне эффектных решений заключаются в сложности комплексной оценки состоятельности и конкурентоспособности проектов, реальных потребностей развития отрасли, перспектив развития топливного сектора экономики.

---

## Литература к разделу 1

---

1. Ястржемский А. С. Термодинамика и история ее развития. М. ; Л. : Энергия, 1966.
2. Льюэли М. История физики. М. : Мир, 1970.

3. Ломоносов М. В. Избранные философские произведения. М. : Госполитиздат, 1950.
4. Карно С. Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу // Второе начало термодинамики : сборник. М. ; Л. : ГТТИ, 1934.
5. Гесс Г. И. Термохимические исследования. М. : Изд. АН СССР, 1958.
6. Менделеев Д. И. Сочинения. Т. 11. Топливо. М. : Изд. АН СССР, 1949.
7. Михельсон В. А. О нормальной скорости воспламенения гремучих газов. М. 1890.
8. Планк М. Термодинамика. М. : ГИЗ, 1925.
9. Иост В. Горение и взрывы в газах. М. : Изд. ин. лит., 1952.
10. Хиншельвуд С. Н. Химическая термодинамика. М. : ГТТИ, 1933.
11. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959.
12. Хотел Г. Диффузионное горение ламинарных и турбулентных струй // Вопросы горения и детонационных волн : сборник. М. : Оборонгиз, 1958.
13. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М. : Издательство иностранной литературы, 1960.
14. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссепативных структур. М. : Мир, 2012.
15. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М. : Издательство иностранной литературы, 1948.
16. Кинан Дж. Термодинамика. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963.
17. Хейвуд Р. Термодинамика равновесных процессов. М. : Мир, 1983.
18. Семенов Н. Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения. М. : Знание, 1969.
19. Семенов Н. Н. Цепные реакции. М. : Госхимиздат, 1934.
20. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации в газах. М. : Изд. АН СССР, 1944.
21. Зельдович Я. Б., Срдовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. М. ; Л. : Изд. АН СССР, 1947.
22. Иоффе А. Ф. Термодинамика. 1909.
23. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин С. А. Техническая термодинамика. М. : Наука, 1979.
24. Вулис Л. А. Термодинамика газовых потоков. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1950.

---

## **2. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА В ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

---

**П**риводимый ниже обзор имеет целью изложить основные научные представления об организации топочного процесса, сложившиеся к настоящему времени, которые способствуют решению практических инженерных задач.

### **2.1. Горение как комплекс различных процессов**

---

Горение в различных топочных устройствах — это комплекс аэродинамических, химических, физико-химических, термодинамических процессов, тепломассопереноса. Турбулентный диффузионный факел — это сложная пространственная структура, представляющая совокупность полей скорости, температур, концентраций. Полная теория такого факела в настоящее время не разработана, она постоянно совершенствуется, но будет оставаться неисчерпаемой. Теория газового факела разрабатывалась в трудах наших отечественных и зарубежных ученых [1–20].

Выделим ключевые положения теории факела.

1. В современной энергетике для большинства топочных устройств преобразование связанной химической энергии топлива в тепловую

осуществляется в турбулентном потоке. При перемещении реагентов осуществляется их подготовка к воспламенению, смешение, подогрев до температуры реакции, воспламенение, стабилизация формирующегося факела и выгорание горючей смеси.

2. При распространении пламени в горючей газо-воздушной смеси в ламинарном и турбулентном потоке ведущим процессом является передача тепла к свежей смеси молекулярной теплопроводностью и за счет процессов химической кинетики. Определенную роль в подводе тепла к поступающей в топку горючей смеси играет прямое излучение из топки, нагретой футеровки.

3. В соответствии с фазовым состоянием компонентов процесса выделяется:

- гомогенное горение (однородная гомогенная смесь (топливо + окислитель)) стехиометрического состава;
- гетерогенное горение (топливо в твердой или жидкой фазе + газообразный окислитель).

4. При раздельной подаче в топку топлива и воздуха формируется диффузионный факел, в нем процессу горения предшествует подготовка горючей смеси, которая сводится к обеспечению молекулярного контакта горючего и окислителя. Продолжительность этого процесса в реальных условиях многократно выше времени протекания кинетических реакций горения при высокой температуре. Поэтому интенсивность процессов смесеобразования определяет скорость процесса горения и является регулятором основных топочных процессов.

5. Смешение в начальном участке факела определяется действием трех основных механизмов различной значимости:

- конвективный перенос веществ;
- турбулентная диффузия;
- молекулярная диффузия.

Определяющим в формировании горючей смеси в реальных факельных процессах является крупномасштабный турбулентный перенос смешивающих сред со взаимным проникновением и рассредоточением.

6. При организации гетерогенного процесса горения существенную роль в интенсивности этого процесса, его эффективности играет предшествующая подготовка топлива — распыл жидкого топлива на выходе из горелки, образование с помощью кавитационного воздействия водомазутных эмульсий, подогрев мазута, использование пылевидного



топлива с подачей наиболее тонкой пыли в зону начального воспламенения, предварительный подогрев угольной пыли, различные способы физической активации угольных частиц.

7. Воспламенение подготовленной горючей смеси определяется соблюдением следующих условий:

- состав топливо-воздушной смеси находится в концентрационных пределах воспламенения такой смеси;
- нагрев смеси до температуры самовоспламенения, при которой обеспечивается быстрое развитие реакции, реализуется механизм *теплового* воспламенения; в реакции принимают участие наиболее активные молекулы, получающие избыточную кинетическую энергию за счет перераспределения энергии между молекулами при соударении;
- присутствие высокоактивных радикалов, атомов со свободными валентными связями, способных к развитию промежуточных реакций процесса горения с малой энергией активации, определяющих *цепной* механизм воспламенения и горения;
- для формирования начального воспламенения достаточно формирования локальной зоны в потоке газов на выходе из горелки, где обеспечиваются указанные выше условия воспламенения. Поэтому при организации факела состав топливо-воздушной смеси доводят до концентрационных границ воспламенения не во всем объеме смеси, а в части его (зона начального воспламенения), откуда реакция распространяется на весь объем горючей смеси.

8. В качестве необходимого источника тепловой и физико-химической энергии для возбуждения молекул реагентов могут служить рециркулирующие к корню факела высокотемпературные продукты сгорания смеси, содержащие промежуточные активные продукты незавершенной реакции горения. Определенную роль в подводе тепла к подготавливаемой горючей смеси играет прямое излучение из топki, нагретая футеровка.

9. В основной части каждого факела — *зоне активного горения* — процесс идет в диффузионном режиме, в последующей за этим *зоне дожигания* по мере снижения концентрации топлива и окислителя процесс переходит в кинетическую область, занимающую значительную часть топочной камеры.

10. При использовании газообразного топлива организуются различные способы сжигания:

- факельное (в потоке);
- беспламенное горение в узких каналах, пористых материалах, в слое мелкозернистой засыпки.

11. Сжигание твердого топлива осуществляется:

- в пылеугольном факеле;
- в слое (стационарном, кипящем, циркулирующем);
- в виде водоугольной суспензии;
- с предварительной газификацией.

12. Факельное сжигание может осуществляться по линейной траектории с однократным сквозным проходом зоны горения и дожигания либо в вихревых потоках многократной циркуляцией реагентов в зоне горения до полного выгорания.

## **2.2. Аэродинамические процессы формирования факела**

---

### **2.2.1. Условия развития свободной турбулентной струи**

Формирование горючей топливо-воздушной смеси в энергетических установках осуществляется на выходе отдельно подаваемых потоков реагентов в топочную камеру. Развитие каждого из этих двух потоков в топке соответствует основным закономерностям развития свободной изотермической турбулентной затопленной струи в неограниченном пространстве.

#### *1) Особенности развития прямоточной струи в неограниченном пространстве*

В развитии прямоточной турбулентной струи можно выделить следующие существенные особенности:

- малое значение поперечных составляющих скорости, определяющих смешение со смежным спутным потоком; поэтому за скорость струи принимают осевую составляющую скорости закрученного потока;
- при движении струи происходит увеличение ее массы за счет эжекционного захвата окружающей среды, описываемой для круглой струи при  $Re > 2,5 \cdot 10^4$  простым выражением:

$$(M_x - M_0)/M_0 = 2,3 \cdot (a \cdot x)/R_0,$$

где  $M_x$  и  $M_0$  — масса струи в сечении на удалении  $x$  от среза сопла и начальное значение массы струи на выходе из сопла;  $a$  — коэффициент структуры струи, учитывающий ее начальную турбулентность и неравномерность поля скоростей; для круглой струи  $a = 0,07–0,08$ ;  $R_0$  — радиус сопла, из которого происходит истечение струи;

– вовлечение в движение нарастающего количества окружающей среды приводит к потере струей кинетической энергии, торможению и затуханию скорости по оси струи от  $W_0$  до  $W_x$  по закону:

$$W_x/W_0 = 0,96/(a \cdot x/R_0 + 0,29);$$

– в то же время количество движения струи остается постоянным  $m \cdot w = \text{const}$ ;

– внешняя граница турбулентной круглой изотермической струи образует угол раскрытия  $15–22^\circ$ .

Для прямоточной струи эти процессы подчиняются закону сохранения количества движения вдоль оси струи — произведение массы струи (на единицу длины) на скорость потока —  $m \cdot w$ . Физический смысл количества движения — мера действия, соответствующая перемещению определенного количества материи на определенное расстояние за единицу времени. Под действием силы количество движения изменяется численно и по направлению. Основные закономерности развития прямоточных турбулентных струй достаточно полно исследованы и представлены во многих монографиях и учебных пособиях [12; 21; 22].

## 2) Прямоточная плоская турбулентная струя

Плоская прямоточная свободная струя — широко используемая аэродинамическая структура в горелках энергетических котлов (угловые, тангенциальные, горизонтально-щелевые). Она обладает отмеченными свойствами круглой струи:

– подобие профиля скоростей в различных сечениях струи;

– относительная (безразмерная) скорость струи  $W_x/W_0$  пропорциональна относительной величине удаленности рассматриваемого сечения от среза сопла  $x/R$ , где  $R$  — полуширина струи в сечении  $x$ ;

– изменение ширины струи подчиняется линейному закону  $dR/dx = \text{const}$ , следовательно,  $R = x$ .

Специфическим свойством плоской струи является ее неустойчивость — возможность отклонения от оси горелки с примыканием («прилипанием») к прилегающей стенке, нарушение целостности струи

с разделением потока на отдельные узлы. Это общее свойство плоских течений (эффект Коанда) проявляется при определенном отношении ширины струи  $b$  к ее толщине  $c$ :  $b/c > (8-10)$ .

### 3) Условия развития изотермической закрученной струи

Струя, получившая перед выходом в топку вращательное движение вокруг продольной оси, отличается от прямоточной струи возникновением центробежных сил. Эти силы содействуют раскрытию ее, переходу ее к движению по спирали вдоль некой конической поверхности, в то же время препятствуют разрушению этой конической структуры, распаду ее на отдельные струи, диссипации в окружающей среде, формируют устойчивость этой вихревой структуры, перестраивающейся по мере удаления от входного сопла в целостную линейную прямоточную аэродинамическую структуру. Здесь проявляется общее свойство самостабилизации вихревого течения, которое наблюдается и в природе в виде возникающих воздушных воронок, ураганного смерча [22].

Для закрученной струи развитие ее определяется законом сохранения момента количества движения — произведение плотности потока на его скорость в квадрате —  $\rho w^2$ .

Этот параметр является динамической характеристикой вращательного движения материальной точки, отражает величину угловой скорости, центробежный момент инерции.

Специфические особенности закрученной струи выражаются прежде всего в ее структуре:

- в закрученной струе в каждой точке имеются три составляющие скорости: осевая, радиальная и тангенциальная (по касательной к поперечному сечению струи);
- по оси закрученной струи формируется зона обратных токов (зона рециркуляции);
- структура закрученной струи в начальном участке ее свободного развития существенно неоднородна; однако, уже на расстоянии одного калибра (диаметр выходного канала струи) градиент всех составляющих характеристик струи значительно уменьшается, зона обратных токов исчезает. На расстоянии двух калибров происходит выравнивание по сечению струи концентрации смешиваемых сред, температуры потока.

Основные аэродинамические характеристики закрученной струи:

- угол раскрытия струи;

- профиль скоростей;
- изменение максимальной скорости вдоль струи;
- максимальная скорость обратного течения;
- длина зоны рециркуляции;
- количество рециркулирующих газов;
- величина начальной крутки вихревой струи.

### 2.2.2. Взаимодействие струи с потоками в топочной камере

Развитие струи, вводимой в топочную камеру, осуществляется при различных конфигурациях устья выходного канала, относительного положения оси струи и направленности траектории смежного потока.

#### *1) Развитие прямоточной струи в поперечном прямоточном потоке*

Нужно подчеркнуть, что под воздействием сносящего поперечного потока не происходитклонения струи с сохранением ее начальной структуры. Струя в этих условиях размывается сносящим потоком с образованием принципиально новой вихревой структуры. Поэтому можно лишь условно говорить об изогнутой оси струи в сносящем потоке. Начальная траектория и структура струи сохраняются на участке конической формы, ось которого сохраняет начальное направление струи. Под воздействием сносящего потока происходит постепенное разрушение периферии струи, сносимые ее компоненты трансформируются в систему парных вихрей. Они развиваются в аэродинамическом следе исчезающей начальной структуры струи, смещаясь по направлению начальной скорости струи и одновременно по направлению основного сносящего потока. В результате происходит перенос газового компонента разрушаемой струи с заглублением по некой криволинейной траектории. Для оценки развития поперечной струи служат следующие основные характеристики:

- заглубление  $h$  (глубина проникновения в сносящий поток);
- протяженность  $L$  участка, на котором траектория струи принимает направление сносящего потока;
- диаметр струи  $D$ , на удалении  $L$  от оси выходного отверстия струи, где заканчивается «поворот» струи.

Определяющим фактором в оценке указанных параметров является отношение количества движения струи и потока  $\rho w^2 / \rho_n w_n^2$  [23]. Приближенно глубина проникновения струи (при истечении из ряда

расположенных горизонтально отверстий) оценивается по формуле [21]:

$$h/D = k_s \sin \alpha (w_0/w_n) (\rho_0/\rho_n)^{1/2}.$$

где  $k_s$  зависит от относительного шага струй в ряду  $S$ ;

$S/D$	$\infty$	16	8	4
$k_s$	2,2	1,9	1,7	1,6

При значении  $L/D > 7-8$  проникновение струи меняется незначительно [24].

### 2) Развитие прямоточной струи в закрученном поперечном потоке

Подобные процессы характерны для формирования газового факела непосредственно в горелке в зоне ввода струй газа в закрученный поток воздуха перпендикулярно оси воздушного канала. Учесть крутку сносящего потока можно исходя из среднего интегрального значения действительной скорости воздуха в зоне развития газовой струи:

$$v_l = \int_0^l v_i dR,$$

где  $l$  — глубина проникновения по верхней кромке;  $R$  — радиус цилиндрического воздушного канала;  $v_i$  — текущее значение действительной скорости воздуха [25].

### 3) Закрученная струя в прямоточном сносящем потоке

Особенность развития закрученной струи, поступающей в топку, связана с возникновением в ней поля давлений под действием центробежных сил.

Скорость крутки для слабозакрученной струи возрастает от нуля на оси струи до максимального значения на ее граничной конической поверхности. С ростом скорости крутки под действием центробежного эффекта возникает разрежение в приосевой зоне и встречное обратное течение. В результате такой деформации струи наружные ее размеры увеличиваются.

Закрученная струя, взаимодействующая с потоком топочных газов, — характерная аэродинамическая структура, используемая при организации топочных процессов (ввод топливовоздушной смеси

из вихревых горелок, ввод в топку части аэросмеси при организации трехступенчатого сжигания). В последнем случае для максимального заполнения топочного объема восстановительной средой в восстановительной зоне и эффективного равномерного заполнения сечения топки дожигательным воздухом используются специфические свойства прямоточной и закрученной струй. Закрученная струя в сносящем потоке по сравнению с прямоточной обладает большим углом раскрытия и меньшей дальностью. Комбинация этих аэродинамических структур позволяет повысить равномерность их распределения в сечении топки.

Исследования закрученной струи в сносящем потоке показали:

- сильное влияние параметра крутки на процесс смешения;
- с увеличением параметра  $n$  происходит более интенсивное размывание струи поперечным потоком, уменьшение ее дальности [26];

- установлены основные параметры развития вихревого факела в топке, который подчиняется основным закономерностям развития изотермической вихревой структуры струи.

Для определения конфигурации закрученной струи в сносящем потоке возможно использовать с некоторыми изменениями обобщенные переменные и функции, примененные в источниках [27; 28] для описания прямой струи в поперечном потоке.

#### *4) Характер развития коаксиальной струи*

Коаксиальная сложная газовая струя может быть образована различными по аэродинамической структуре струями — центральной (осевой) и периферийной (кольцевой):

- обе струи могут быть прямоточными, здесь имеет место спутное движение;
- одна из струй может быть закручена; на практике в горелочных устройствах обычно прямоточной выполняется центральная струя;
- обе струи могут выполняться закрученными в одном или встречном направлении.

При спутном движении обеих струй коаксиального потока существенную роль в смешении сред играет соотношение скорости составляющих концентричных струй внешнего спутного потока  $w_n$  и начальной скорости струи  $w_o$ :

$$m = w_n / w_o.$$



С увеличением скорости внешнего кольцевого потока на основном участке струи уменьшается смещение ее со спутным потоком. Боковая граница центральной струи криволинейна вследствие изменения скорости на оси струи.

При взаимодействии центрально прямооточной струи с охватывающим concentричным закрученным потоком в развитии сложной коаксиальной струи основное влияние оказывает закручивание периферийной струи [29]. Оно определяет границы струи, интенсивность зоны обратных токов, затухания ее и смещения струи со смежным потоком. Граница приосевой струи носит прямолинейный характер.

Для закрученной центральной струи турбулентное ее течение существенно зависит от центробежных сил, создающих градиент давлений с формированием встречного приосевого тока вдоль оси струи. Как отмечается в [22], спутный прямооточный поток играет как бы роль сохраняющей оболочки, препятствуя спаду интенсивности крутки центральной струи, граница ее становится параболической. Эта струя обладает большей стабильностью, сохраняя на большем протяжении начальную крутку.

К настоящему времени разработан математический аппарат для расчета развития сложных коаксиальных струй с различной аэродинамической структурой [30].

### **2.2.3. Направленное формирование прямоструйного диффузионного факела**

В формировании диффузионного факела решающее значение имеет оптимизация аэродинамической структуры горящего потока газозооушной смеси. Исследования Л. А. Вулиса и ряда зарубежных ученых [2] показали, что смещение прямооточных спутных струй и окружающего потока происходит наименее интенсивно при равенстве начального значения  $\rho w^2$  в спутных прямооточной струе и окружающем потоке. С увеличением градиента скоростей возрастает интенсивность поперечного крупномасштабного турбулентного массотеплопереноса, способствующего выравниванию состава смеси по сечению потока. Это указывает на возможность управления прямоструйным факелом:

- достижение наибольшей дальнотойности факела соответствует выравниванию значения параметра  $\rho w^2$  для спутных потоков;
- повышение эффективности смещения спутных потока топлива и воздушного потока, соответствующее сокращение длины факела

достигаются при максимально возможной разности значений  $\rho w^2$  для спутных потоков; при этом складываются неблагоприятные условия для ограничения образования оксидов азота.

В диффузионном прямоточном факеле, образованном центральной топливной струей и охватываемым коаксиальным ламинарным потоком окислителя, складывается градиент концентрации состава смеси с нарастанием в радиальном направлении избытка воздуха от нулевого значения. На определенном удалении от оси ламинарных потоков устанавливается стехиометрическое соотношение топливо/воздух  $\alpha = 1$ . Здесь и формируется устойчивый фронт пламени. Продукты горения будут распространяться от фронта пламени в обе стороны [8]. Для диффузионного ламинарного факела при постоянном расходе газа изменение диаметра центрального газового сопла горелки не приводит к изменению длины факела, она определяется коэффициентом диффузии. Если же одновременно увеличивать скорость воздуха, то длина факела будет увеличиваться пропорционально до тех пор, пока поток не перейдет в турбулентный режим течения. Здесь уже существенно поразному изменяются протяженность зоны горения («химическая» длина факела) и протяженность струи (аэродинамическая длина). С увеличением скорости истечения сред увеличение протяженности струи опережает удлинение факела.

В турбулентном потоке выравнивание состава отдельно вводимых потоков топлива и воздуха определяется интенсивностью поперечного переноса отдельных молей. Движение молей поперек потока носит пульсирующий характер, соответственно турбулентным возмущениям потока различного масштаба — от крупномасштабных до мелкомасштабных пульсаций. Соответственно изменяется характер диффузии сред со взаимопроникновением и выравниванием состава по сечению — от молекулярной диффузии к доминирующей роли турбулентной диффузии.

#### **2.2.4. Особенности организации вихревого факела**

1. Общие свойства закрученных струй определяют наиболее существенные характеристики вихревого факела:

- повышенная интенсивность смесеобразования по сравнению с прямоточным факелом;
- больший угол раскрытия струи при выходе из горелки как следствие интенсивного смесеобразования;

- повышенная эжектирующая способность — увеличенные размеры приосевой зоны обратных токов;
- меньшая дальнобойность;
- с увеличением крутки ядро факела смещается к устью горелки;
- длина ядра факела сокращается.

Указанные изменения параметров вихревого факела наблюдаются при повышении показателя крутки. Показателем интенсивности крутки потока может служить отношение комплекса  $M$ , отражающего значения аксиальной  $u_x$  и тангенциально составляющей скорости  $u_y$  в рассматриваемом сечении струи и момент количества движения закрученной струи, и комплекса  $K$ , отражающего значение динамического напора по осевой составляющей скорости:

$$n = M \cdot c / K \cdot d,$$

$$M = \int_F \rho u_x u_y r_y dF \quad K = \int_F (\rho u_x^2 + p) dF,$$

где  $\rho$  — плотность среды,  $p$  — статическое давление,  $r$  — расстояние от оси струи до рассматриваемой точки на рассматриваемой площадке  $F$  в сечении струи  $x$ .

Исходя из этой универсальной зависимости, оценивается значение параметра крутки  $n$  для каждого вида воздушного завихрителя (тангенциальный входной патрубок, улиточный входной патрубок, тангенциальный лопаточный завихритель, аксиальный лопаточный завихритель) по конструктивным параметрам закручивающих устройств [25].

2. При развитии вихревого факела в топочной камере происходит раскрутка его с выравниванием осевых скоростей в сечении факела на расстоянии в среднем 2,5 диаметра амбразуры от среза горелки. Спиральный участок вихревого факела занимает около половины общей длины факела.

3. Регулирование длины факела вихревых горелок может осуществляться различными конструктивными и режимными способами:

- увеличение интенсивности крутки воздушного потока; двукратному росту интенсивности крутки соответствует сокращение длины газового факела на 30–40 %;
- переход от цилиндрической амбразуры горелки к конической резко сокращает длину факела.

Рассмотренные способы воздействия на вихревой газовый факел ограничиваются изменением геометрии и конфигурации факела.

Однако этим не исчерпываются возможности управлением вихревого факела. Широкий диапазон управления направлением и структурой вихревого факела на выходе из горелки может обеспечивать способ воздействия на вихревой поток радиальным струйным вдувом по всему контуру. Этот способ подробнее рассмотрен в разделе 8.

4. Изменение крутки факела сказывается не только на структуре факела и динамике выгорания смеси, но также приводит к заметному изменению параметров процессов в топочной камере. Так, с увеличением крутки:

- происходит пераспределение тепловосприятия фронтальной стенки и заднего экрана с увеличением потока тепла к фронтальной стенке (при фронтальном размещении горелок);
- увеличивается тепловосприятие экранных поверхностей нижней части топки;
- снижается температура газов на выходе из топки.

#### **2.2.5. Аэродинамическая характеристика турбулентного диффузионного факела**

Характеристика факела складывается под влиянием общих факторов организации процесса горения топливовоздушной смеси и конструктивных особенностей горелки. Включаемые в характеристику индивидуального факела параметры отражают не только условия его формирования, воспламенения, выгорания горючей смеси, но также условия развития последующих процессов в топочной камере (теплообмен, распределение тепловыделения по высоте топки, температурный режим поверхностей нагрева).

Структура индивидуального факела характеризуется распределением в его объеме (в сечении и по длине) концентрации исходного топлива и продуктов сгорания, температуры, скорости среды, динамического напора; поля этих показателей определяют все производные характеристики факела [5–7]:

1) *границы факела* соответствуют замкнутой поверхности, охватывающей область потока, на которой скорость в направлении по оси струи достигает нулевого значения; в этих границах находятся зона горения, центральная приосевая зона обратных токов в вихревых горелках, зона формирования горючей газовой смеси;

2) *длина факела* — расстояние от выходного сечения горелки, на котором горение завершается — химический недожог сводится к нулю;

3) *дальнобойность факела* — эта аэродинамическая характеристика факела, используемая для оценки заглубления его в сносящем потоке топочных газов; она определяется удалением от выхода из горелки плоскости, в которой осевая скорость достигает нулевого значения, факел завершает склонение в направлении движения топочных газов; этот показатель не связан с динамикой выгорания горючей смеси в факеле;

4) *динамика тепловыделения в факеле* — оценивается степенью выгорания топлива (в долях от общей теплоты сгорания используемого топлива) в каждом рассматриваемом сечении факела последовательно по его длине;

5) *турбулентность потоков*, создаваемая закруткой потоков топлива и окислителя; служит для интенсификации смесеобразования.

## 2.3. Интенсивность смешения потоков реагентов в диффузионном факеле как фактор скорости выгорания горючей смеси

### 2.3.1. Показатели эффективности смешения

Для оценки эффективности смешения и полноты смесеобразования в каждом сечении по длине факела могут служить следующие основные показатели, получаемые по распределению концентрации топлива в воздухе:

- отношение массового количества смеси, состав которой достигает концентрационных пределов воспламенения смеси  $G_{\text{см. гор}}$ , к общему массовому расходу реагентов  $G_{\text{см}}$ ; показатель  $G_{\text{см. гор}}/G_{\text{см}}$  характеризует условия начального воспламенения смеси;

- в холодном факеле (без воспламенения) — отношение массового расхода смеси, состав которой достиг расчетного значения смеси (близкого к стехиометрическому составу)  $G_{\text{см. расч}}$  к общему массовому расходу смеси  $G_{\text{см}}$ ; изменение показателей  $(G_{\text{см. расч}}/G_{\text{см}})_i$  от сечения к сечению характеризует динамику и эффективность смесеобразования по длине факела — важнейшего этапа процесса горения в диффузионном факельном процессе.

Динамика выгорания топлива по длине факела — отношение доли сгоревшего топлива  $V_{\text{сгор}}$  в данном сечении к расходу исходного то-

плива (определяемая по полям концентраций, температур и скоростей) в принципе совпадает с динамикой образования смеси горючей концентрации, но существенно опережает динамику формирования смеси стехиометрического состава. Это связано с тем, что основная часть топлива выгорает в начальном участке факела в зонах с повышенным избытком воздуха. Догорание остальной части топлива происходит уже после выравнивания состава смеси по сечению факела, где скорость кинетических процессов в условиях снижения температуры и концентрации реагентов (окислителя и топлива) снижается.

### **2.3.2. Турбулизация потоков топливо-воздушной смеси как способ ускорения смесеобразования**

В турбулентном диффузионном газовом факеле скорость горения в решающей степени определяется частотой соударения молекул топлива и окислителя, в пылеугольном факеле таким фактором является подвод необходимого количества воздуха к поверхности угольной частицы. В обоих случаях интенсификация взаимодействия реагентов горючей смеси обеспечивается турбулизацией потоков в зоне смешения.

Турбулизация смежных спутных потоков (наиболее характерная ситуация для топочно-горелочных устройств в энергетике) при совпадении скоростей потоков формируется в граничном слое в результате мелкомасштабной турбулентности. С ростом градиента скорости взаимодействие смежных потоков переходит в крупномасштабный поперечный массообмен, складывается интенсивная турбулентность, охватывающая не только граничную зону контакта струй, но и все их сечение. Условия взаимодействия струй характеризуются гидродинамическим параметром — отношением скоростных напоров смешиваемых потоков  $\rho_1 w_1^2 / \rho_2 w_2^2$ .

1. Крутка потоков на выходе из горелки используется как эффективный способ стабилизации факела и турбулизации потоков. Увеличение крутки потока приводит к увеличению:

- центральной зоны обратных токов;
- интенсивности смешения в потоке различных сред за счет рециркуляции части потока за счет увеличения коэффициента турбулентного обмена, роста градиента скорости.

Способы организации крутки потока:

- улиточный входной аппарат;
- тангенциальный направляющий аппарат;
- осевой лопаточный завихритель.

Для характеристики крутки потока используются различные величины в зависимости от способа формирования крутки. Характеристика крутки, создаваемой осевыми лопаточными завихрителями, сводится иногда к величине угла установки лопаток по отношению к оси канала.

## **2.4. Основные положения кинетики процессов горения энергетических топлив**

---

### **2.4.1. Некоторые принципы химической термодинамики**

Краткое изложение некоторых принципов химической термодинамики [17; 19; 20] позволит ориентироваться в процессах горения, не только использовать некоторые математические формулы, но и понимать их физико-химическую сущность.

Скорость реакции в гомогенной системе в каждый момент времени пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ. Коэффициент пропорциональности этой зависимости  $k$  — константа скорости реакции. Константа зависит от температуры смеси  $T$ . При постоянном значении  $T$  постоянна и константа  $k = \text{const}$ .

$$w = -dC/d\tau = k C_A C_B.$$

По мере выгорания топлива концентрация исходных реагентов в реагирующей системе непрерывно снижается, одновременно нарастает концентрация продуктов сгорания. Скорость реакции снижается, изменение ее описывается уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 \exp(-E/RT)$$

где  $k_0$  — предэкспоненциальный множитель, величина постоянная.

Энергия активации  $E$  — это величина энергии, необходимой для разрушения внутримолекулярных связей реагирующих веществ. Наименьшее значение энергии активации соответствует реакциям, протекающим с участием свободных атомов, радикалов, так как здесь не требуется затрачивать энергию на разрушение внутримолекулярных связей. Для большинства газов энергия активации составляет 84–126 кДж/моль.



Комплекс  $\exp(-E/RT)$  представляет собой отношение числа столкновений молекул, приводящих к реакции к общему числу столкновений молекул в смеси ( $R$  — универсальная газовая постоянная).

В общем случае скорость реакции выражается формулой:

$$w = k_0 \exp(-E/RT) f(C),$$

где  $f(C)$  — некоторая функция концентрации реагирующего вещества, находящегося в недостатке относительно стехиометрического значения.

#### 2.4.2. Химические реакции горения гомогенной горючей смеси

##### 1) Условия развития реакции горения горючей газовой смеси

Основными факторами развития реакции горения горючей газовой смеси служат:

- температура реагирующей смеси;
- исходная концентрация реагирующих веществ;
- давление.

1. *С ростом температуры растет количество соударений реагирующих молекул, что должно способствовать росту скорости реакции.* Влияние это связано с тем, что для совершения химической реакции необходимо предварительно ослабить внутренние связи стабильной молекулы, для этого необходимо затратить энергию  $E$ . Эта энергия, необходимая для перестройки внутримолекулярных связей, для обеспечения его готовности к вступлению в реакцию — иначе говоря, для преодоления «энергетического барьера реакции», — называется энергией активации.

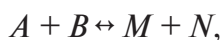
2. При бимолекулярной реакции скорость реакции зависит от состава газовой горючей смеси, состоящей из топлива и окислителя. Скорость реакции нарастает с увеличением доли топлива в смеси до некоторого максимума соответствующей смеси стехиометрического состава и далее снижается, стремясь к нулю. В реагирующей смеси концентрация исходной горючей в горящей струе (по мере развития реакции горения) смеси снижается при одновременном увеличении концентрации продуктов сгорания. *По закону действующих масс скорость реакции пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ.* Это связано с тем, что реакция осуществляется только при столкновении молекул, а вероятность их столкновений пропорциональна концентрациям каждого из веществ.

3. По мере расходования исходных реагентов скорость реакции уменьшается до достижения равновесной концентрации исходных ве-



ществ и продуктов реакции. Поэтому формула Аррениуса справедлива в начальный период горения (и прежде всего, при воспламенении), т. е. в начальном участке факела. Однако по мере израсходования реагирующих веществ и снижения их концентрации скорость реакции падает.

4. Одновременно с реакциями окисления горючего газа и образования продуктов сгорания протекают обратные реакции разложения продуктов сгорания — диссоциация. Поэтому скорость процесса горения определяется разностью скоростей прямой и обратной реакции в каждый момент времени развития процессе горения.



$$w = dC/d\tau = k_1 C_A C_B - k_2 C_M C_N,$$

где  $A$  и  $B$  — исходные реагенты;  $M$  и  $N$  — продукты реакции;  $k$  — константа реакции;  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_M$ ,  $C_N$  — концентрация исходных веществ и конечных продуктов реакции.

При достижении равенства прямой и обратной реакции суммарная скорость реакции будет равна нулю, наступает динамическое химическое равновесие.

## 2) Механизмы химической реакции горения гомогенных смесей

1. По Аррениусу реакция развивается не при всех соударениях молекул, а лишь при столкновении молекул, обладающих избытком энергии над критическим уровнем — энергией активации. Эти молекулы называются активными. Их немного при нормальной температуре, они находятся в конце Максвелл–Больцмановского распределения молекул по величине внутренней энергии, с ростом температуры нормальные молекулы могут без химического превращения становиться активными с поглощением определенного количества тепловой энергии из окружающей смеси.

2. Подавляющее большинство значимых для техники реакций (в том числе и горения) идут не по простому прямому пути: от исходных веществ к продуктам реакции, при котором сумма исходных веществ равна сумме конечных продуктов. Переход этот осуществляется по сложной развитой системе побочных реакций с образованием промежуточных веществ, отсутствующих в начале и конце реакции. Такие реакции называются цепными. Уже Вант-Гофф установил, что реакция прямого перехода из начального в конечное состояние осу-

шествуется лишь в редких случаях. Ряд последовательных непрямых реакций обеспечивает большую скорость перехода от исходных веществ к продуктам сгорания, нежели прямая реакция по стехиометрическому уравнению. Объясняется это малой величиной энергии активации промежуточных продуктов, образующихся в ходе многоступенчатой реакции. Скорость реакции в каждой ступени увеличивается на несколько порядков, поскольку энергия активации  $E$  входит в константу скорости реакции в показателе степенной функции.

3. Резкое нарастание скорости реакции имеет место при цепном развитии ее. Высокоактивные продукты промежуточных реакций, так называемые активные центры (активные частицы), обладают высокой химической активностью.

Инициаторами цепной реакции могут служить свободные радикалы или атомы, образующиеся за счет наиболее динамичных («горячих») молекул при их распаде. Они вступают в реакции с молекулами топлива и окислителя, разрушают их, образуя конечные продукты реакции и одновременно новые промежуточные активные вещества — активные центры, повторяющие циклы предшествующих реакций. Если в результате каждой промежуточной реакции наряду с конечными продуктами горения возникает не более одной активной частицы (атомов, гидроксильной группы), то имеет место *неразветвленная цепная реакция горения*. При увеличенном числе активных частиц в каждом реакционно эффективном столкновении молекул постоянное лавинообразное нарастание в смеси активных центров приводит к самоускорению процесса горения — имеет место *разветвленная цепная реакция*. Основными промежуточными высокоактивными веществами в процессе горения газообразных топлив являются атомы водорода H, атомы кислорода O, гидроксильная группа OH.

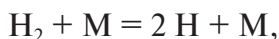
Таким образом, в цепных реакциях горения имеют место следующие процессы:

- образование активных частиц из исходных веществ при столкновении их активных молекул;
- разветвление цепей реакций, при которых одна активная частица реагирует с исходными веществами (одновременно с топливом и окислителем), порождая конечные продукты реакции с образованием двух или нескольких активных частиц (атомы, гидроксильная группа); в результате идет разгон реакции до максимальной скорости;

— обрыв цепей осуществляется на стенках канала, в результате реакций; если скорость обрыва цепей больше скорости разветвления реакции, то скорость реакции стабилизируется, процесс идет по неразветвленной цепи.

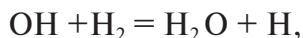
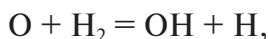
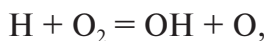
Примером схемы последовательного развития цепной реакции может служить реакция горения водорода, в которой активными центрами служат атомы водорода, кислорода, радикал  $\text{OH}$ :

*процесс зарождения цепей при соударении молекул:*

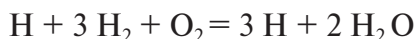


где  $\text{M}$  — наиболее активные молекулы

*последовательная цепь реакций*



*итоговый результат цикла реакций*



Итак, вступление в реакцию одного атома водорода, возникшего в результате столкновения активных молекул исходной горючей газовой смеси, вызвало образование двух молекул воды (как это происходит и в прямой реакции горения водорода в качестве конечного ее продукта) и возникновение трех активных центров — атомов водорода. Имеет место *разветвленная цепная реакция*. По таким реакциям идет горение других газообразных топлив — оксида углерода, метана и других углеводородов.

### 3) Цепное и тепловое воспламенение

Самовоспламенение, как цепное, так и тепловое, связано с выделением тепловой энергии горючего. Тепловые механизмы развития реакции в гомогенных горючих смесях действуют при самовоспламенении этих смесей и их поджигании тепловым источником. В случае теплового воспламенения тепловая энергия уходит на повышение температуры смеси, с ростом которой повышается активность «быстрых» молекул. При высоком подогреве исходной смеси, когда выделяющееся при этом тепло  $Q_1$  не успевает отводиться в окружающую среду  $Q_2$ , т. е.  $Q_1 > Q_2$ , происходит лавинообразный процесс роста температуры и ско-

рость реакции по экспоненциальному закону — идет процесс самовоспламенения (за счет собственного тепла реакции).

В цепном механизме это выделяющееся собственное тепло реакции идет на образование свободных атомов, радикалов и молекул исходной смеси, т. е. превращается в химическую энергию этих реакционноспособных частиц, разложение которых вызывает автоускорение реакции [2–4].

#### 4) *Вынужденное воспламенение горючей газовой смеси*

Вынужденное воспламенение горючей смеси может осуществляться:

а) *от искры*, при этом возможны два различных механизма:  
— физико-химическое воздействие, при котором существенную роль в воспламенении смеси от искры играют активные частицы типа свободных атомов и радикалов, в больших количествах образующихся в среде, окружающей искры;

— тепловое воздействие — искра рассматривается как тепловой точечный источник;

б) *от нагретого тела, помещенного в поток смеси*, при этом условия воспламенения определяются температурой, размером и конфигурацией тела, скоростью потока. Существенную роль играют вихревые течения при обтекании тела, которые инициируют воспламенение, создавая зону обратных токов (аэродинамический след обтекания тел) с малыми скоростями;

в) *от горячей струи*, инертная, не содержащая окислителя струя реализует тепловой механизм зажигания, как и нагретое тело. Однако если для зажигания используется струя продуктов неполного горения горючей смеси, то возможно проявление цепного механизма воспламенения. Эти процессы реализуются в энергетических устройствах при стабилизации факела с помощью рециркуляции горючих продуктов сгорания к корню факела в горелках энергетических котлов, при запуске блочных камер сгорания ГТУ с помощью пламяперекидных патрубков, связывающих отдельные изолированные секции камеры сгорания. В обоих случаях важнейшим фактором воспламенения являются процессы теплопередачи и диффузии от источника зажигания к основной массе смеси;

г) *при сжатии смеси* (адиабатическое воспламенение) в двигателях внутреннего сгорания. При зажигании путем адиабатического сжигания температура во всех точках объема зажигаемой смеси одинакова, процессы диффузии и теплопередачи в объеме смеси отсутствуют.

### 5) Стабилизация пламени

После начального воспламенения горючей смеси следующим фактором, определяющим стабильность процесса горения, не зависящего от внешнего источника воспламенения, является стабилизация пламени.

Теоретически тепло, выделяемое при горении, может использоваться для передачи его подходящей свежей смеси. Для ламинарной и турбулентной прямоточной струи устойчивость факела на выходе горючей смеси из сопла может быть обеспечена при равенстве скорости горения и скорости струи в условиях крайне неустойчивого равновесия. Любое отклонение от этого условия нарушит стабильность факела — при большей скорости струи факел будет оторван от среза сопла и горение прекратится, при малой скорости струи фронт пламени будет смещаться внутрь сопла и далее по каналу смеси. Последуют аварийные ситуации. Малая скорость горения (для метано-воздушной смеси около 20 см/с) исключает возможность использования этого механизма стабилизации в технических устройствах.

В топочных устройствах различных энергетических установок реализуется принцип автостабилизации факела с использованием тепловой энергии основного потока горючей смеси.

В струйно-стабилизаторных устройствах, используемых, в частности, для догрева выхлопных газов после ГТУ, с помощью плохобтекаемых тел формируется зона обратных токов в аэродинамической тени стабилизаторов с малыми скоростями высокотемпературных продуктов, которые осуществляют постоянное воспламенение основного линейного потока горячей смеси.

При закрутке потока горючей смеси на выходе из типовых горелок энергетических котлов по оси его возникает зона обратных токов, в которой рециркулируют высокотемпературные продукты горения смеси, переносящие тепловую энергию в зону стабилизации (к выходному сечению завихрителя). Наряду с этой центральной (приосевой) рециркуляцией продуктов сгорания существенную роль может играть рециркуляция по внешней поверхности потока горючей смеси.

Тепловая энергия от продуктов сгорания горючей смеси может быть возвращена в начальный участок потока смеси не только аэродинамическим способом (как это показано выше), но также использованием теплопроводности стенки канала, в котором движется горючая смесь. После начального воспламенения смеси и достаточного прогрева стен-

ки канала осуществляется перенос тепла к входному участку канала по стенке против потока. Такой механизм стабилизации горения реализуется в устройствах беспламенного сжигания газа. Пористая керамическая плита разогревается лучистым теплом от внешнего факела; после этого горение перемещается в поры плиты, внешний факел отсутствует. Таков же механизм стабилизации горения при продувке горючей смеси через слой зернистого кускового огнеупорного материала, в крупных керамических каналах.

### 6) Температура горения

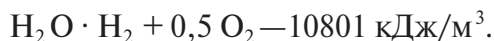
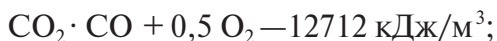
По закону Гесса температура горения не зависит от последовательности различных химических реакций, а только от начального и конечного состояния газа. Поэтому для любой организации факела — ламинарной, турбулентной, диффузионной — температура продуктов горения при одинаковой полноте горения будет одна и та же. При невысокой температуре горения (до 2000 К) значение температур соответствует адиабатным условиям горения стехиометрической смеси и определяется по балансу тепла:

$$T_{\text{макс}} = (Q_p + q_r + q_b) / (\sum C_{\text{п.с}} \cdot V_{\text{п.с}}),$$

где  $Q_p$  — тепловой эффект реакции;  $q_r + q_b$  — физическое тепло газа и воздуха при начальных параметрах смеси;  $C_{\text{п.с}}$  — теплоемкость продуктов сгорания;  $V_{\text{п.с}}$  — выход продуктов сгорания на единицу количества горючего газа.

Так оценивается *адиабатная температура горения*, при такой организации процесса, когда все выделяющееся тепло используется только на нагрев продуктов сгорания. Однако в действительности реально достигаемая температура горения будет ниже, так как при высоких температурах горения реакция горения полностью не завершается. При высоких температурах выше 2000–2200 К существенную роль играет диссоциация продуктов горения, на которую затрачивается энергия. Поэтому значение температуры горения может оказаться существенно ниже расчетного значения по приведенной формуле. С учетом теплового эффекта диссоциации продуктов горения —  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  — и в отсутствие тепловых потерь определяется *теоретическая температура горения*.

Доля неиспользованного потенциального тепла в завершенном процессе горения  $q_{\text{дисс}}$  равна сумме тепловых эффектов диссоциации продуктов сгорания. Диссоциация водяных паров и диоксида углерода является эндотермической реакцией с поглощением тепла и увеличением объема:



Тепло, затрачиваемое на диссоциацию водяного пара и диоксида углерода, определяется по формуле:

$$q_{\text{дисс}} \cdot 108,01 \cdot a \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 127,12 \cdot b \cdot V_{\text{CO}_2}, \text{ кДж/м}^3,$$

где  $a$  и  $b$  — степень диссоциации водяных паров и диоксида углерода, %.

Степень диссоциации водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$  и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  находится в зависимости от парциального давления.

Реальная максимальная температура свободного факела с учетом потерь теплоты за счет излучения и отдачи ее экранированным поверхностям будет существенно ниже теоретической. Максимальная температура свободного пламени для различных газов топливно-воздушной смеси стехиометрического состава при нормальных физических условиях приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Максимальная температура свободного пламени**

Газ	$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$
Температура, °C	2045	2100	1870	1890

### 7) Скорость горения

Из приведенных выше сведений можно выделить факторы, определяющие скорость реакции горения гомогенной горючей газовой смеси, определяемой как скорость изменения концентрации одного из компонентов горючей смеси.

1. *С повышением температуры факела* за счет тепловыделения при горении смеси скорость реакции резко нарастает по экспоненциальному закону. Константа скорости реакции

$$k = k_0 e^{-E/RT},$$

где  $k_0$  характеризует общее число столкновений молекул,  $k$  — число прореагировавших молекул,  $E$  — минимальная энергия сталкивающихся молекул, обеспечивающая эффективность столкновения;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

2. *С уменьшением концентрации компонентов горючей смеси* скорость процесса горения снижается *линейно*.



3. *С повышением давления скорость реакции:*
- первого порядка (мономолекулярная реакция) нарастает пропорционально росту давления среды;
  - второго порядка (бимолекулярная реакция между двумя молекулами) пропорциональна квадрату давления;
  - третьего порядка (тримолекулярная реакция) пропорциональна давлению в третьей степени.

### **2.4.3. Условия воспламенения и горения гетерогенных горючих смесей**

#### *1) Организация сжигания пылевоздушной смеси в топочных устройствах*

Твердое топливо в энергетических котлах сжигается в пылевидном состоянии в топках с факельным сжиганием, а также в виде дробленки в вихревых, слоевых топках, в топках с циркулирующим слоем. При факельном сжигании пыль может поступать в топку в сопровождении части воздуха (первичного воздуха, составляющего 20–30 % общего расхода воздуха на сжигание топлива), остальной — вторичный воздух — подается в топку через отдельные каналы горелок. При подаче в горелки высококонцентрированной аэросмеси по отдельному центральному каналу высоконапорным холодным воздухом (не более 1 % общего расхода воздуха) потоки аэросмеси и горячего воздуха на выходе из горелки образуют систему турбулентных неизометрических струй. Усилиями большой группы теоретиков, инженеров-практиков сформулированы основные принципы воспламенения и горения твердого энергетического топлива, которые служат основой работы конструкторов, технологов-эксплуатационников, наладчиков.

#### *2) Основные пути интенсификации горения угольной частицы*

Технология факельного сжигания пылевидного твердого топлива складывалась в нашей стране в конце 20-х гг. В ходе ее освоения были установлены основные пути повышения интенсивности горения угольной пыли:

- увеличение тонкости помола;
- подогрев воздуха перед вводом в факел;
- разделение всего количества воздуха для сгорания топлива на первичный (необходимый для сгорания летучих) и вторичный воздух (используемый для последующего сжигания углеродной массы коксового остатка);



— доля первичного воздуха, вводимого в топку с угольной пылью, составляет до 40 %, с утонением пыли эта величина может быть уменьшена.

В исследованиях Нуссельта (1923 г.), табл. 2.2, впервые была дана оценка скорости выгорания угольных частиц в потоке при достаточном избытке воздуха, которая не столь уж значительно отличается от результатов многочисленных научных работ в последующие десятилетия.

Таблица 2.2

**Время сгорания пылевидного топлива в зависимости от размера пылинок**

Диаметр пылинок, мм	2,0	1,0	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01
Время сгорания, с	110,4	27,8	1,104	0,2	0,055	0,011	0,0028

### 3) Основные стадии воспламенения и горения угольных частиц

Горение частицы твердого топлива является гетерогенным процессом. Ему предшествует подвод окислителя к реагирующей поверхности молекулярной и турбулентной диффузией, подвод тепла к углеродной массе. Воспламенение и горение частиц угольной пыли развивается через **четыре четко различаемые последовательные стадии** [31]:

1. *Разогрев частицы с выделением летучих* до воспламенения летучих веществ, выделяющихся при термическом распаде наиболее неустойчивых соединений угля; фронт пламени имеет сферическую форму;

2. *Воспламенение и выгорание летучих*; по мере разогрева частицы происходит выделение наиболее тяжелых фракций в виде паров, жидких выделений, которые образуют на поверхности частицы постепенно нарастающие отложения пека, которые воспламеняются, и после выгорания летучих (активно перехватывающих кислород) начинается интенсивное выгорание пека;

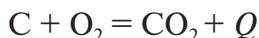
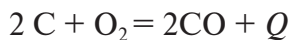
3. Выгорание пека способствует развитию третьей стадии горения угольной частицы — в результате горения пека на поверхности частицы происходит прогрев ее и *воспламенение основного коксового остатка*;

4. Завершающая стадия — *выгорание коксового остатка*, сопровождающееся частичным разрушением частицы, эрозией ее, образованием в коксовом остатке пор с переходом его в золовой остаток; золовая частица представляет собой пористую массу в форме и размерах исходной частицы угля.

Имеет место наложение отдельных стадий. Так, горение летучих протекает параллельно с процессами третьей и четвертой стадии с некоторым опережением горения летучих.

#### 4) Химические процессы горения углерода

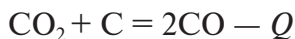
Общая схема реагирования углерода с кислородом газовой фазы:



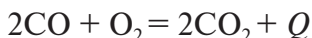
Одновременно развиваются две реакции взаимодействия углерода с кислородом.

Во вторичных процессах

— происходит восстановление диоксида углерода — эндотермическая реакция:



— оксид углерода CO химически взаимодействует с кислородом:



Здесь представлены только итоговые реакции, исключаются промежуточные реакции и промежуточные продукты.

#### 5) Подогрев пылевоздушной смеси в вихревом пылеугольном факеле

Подогрев пылевоздушной смеси, поступающей в топку, осуществляется конвективным теплообменом с рециркулирующими топочными газами в приосевой зоне обратных токов, эжекцией топочных газов к горелке по внешней поверхности струи, а также за счет излучения топочных газов (на долю которых приходится до 10 % в общем балансе тепла).

#### 6) О роли летучих в воспламенении и выгорании аэросмеси

Начальным источником воспламенения потока аэросмеси являются высокотемпературные топочные газы, продукты сгорания непосредственно из самого факела горелки или из топочного объема. Они в результате интенсивного поперечного турбулентного массообмена на границе потока аэросмеси осуществляют воспламенение внешнего слоя аэросмеси. Затем пламя распространяется к оси потока аэросмеси эстафетным порядком за счет тепла, выделяемого при сгорании топливных частиц.

Сгорание летучих, предшествующее воспламенению основной углеродной массы частиц, коксового остатка, создает температуры свыше 1000 °С для углей с выходом летучих 32 % (что выше уровня воспламенения топлива), обеспечивая распространение горения на всю массу аэросмеси. Так складывается процесс при большом выходе летучих.

Со снижением выхода летучих создаваемая при горении температура микрофакелов снижается, для антрацита при  $V^* = 4,0\%$  температура в зоне воспламенения летучих не превышает  $700^\circ\text{C}$ , что недостаточно для зажигания всей массы аэросмеси.

### 7) Разделение воздуха на первичный и вторичный

Это основной принцип организации пылеугольного факела. Он обеспечивает пространственное размежевание процессов начального воспламенения аэросмеси и смешение с основной массой аэросмеси на последующем участке струи. При этом достигается высокая температура в зоне первичного участка факела. Чем меньше выход летучих в угле, тем меньше доля первичного воздуха (для антрацита  $\alpha_1 \geq 0,4$ ) (рис. 2.1). Чем меньше  $\alpha_1$ , тем меньше количество тепла, необходимого для нагревания первичной аэросмеси до температуры воспламенения (до  $1000^\circ\text{C}$ ) — с уменьшением  $\alpha_1$  от 1,2 до 0,2 указанное количество тепла сокращается на 75%.

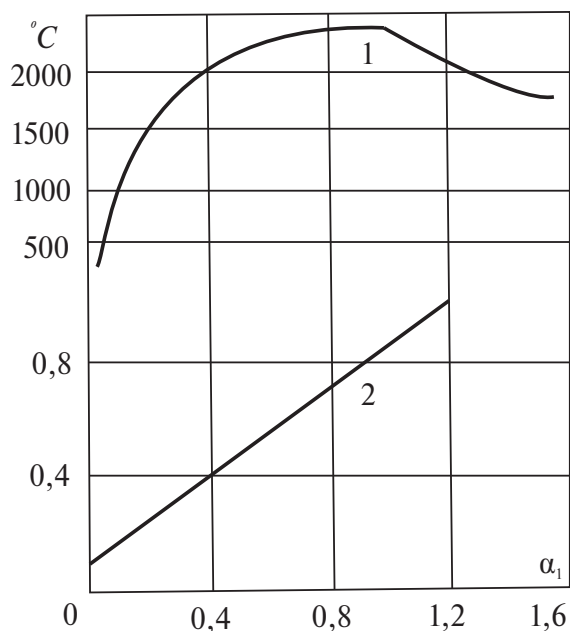


Рис. 2.1. Адиабатическая температура горения антрацитовой пыли в зависимости от доли первичного воздуха:

1 — температура; 2 — относительное количество тепла, необходимого для нагревания смеси до воспламенения [32]

### 8) Основные факторы воздействия на скорость каждой отдельной стадии горения угольной частицы

При очень тонком размоле зола топлива (не являющаяся материнской, когда минеральные вещества не входят непосредственно в углеродную массу) отделяется и в мелких частицах не содержится. В реакцию с окислителем вступают угольные частицы, состоящие только из горючей массы. Твердый углерод является основной горючей составляющей почти всех натуральных твердых топлив, изменяясь от 95 % теплоты сгорания коксового остатка антрацита до 40,5 % теплоты сгорания горючей массы. Нагрев частицы в первом этапе осуществляется в начальный момент времени конвекцией от окружающей газовой среды (которая имеет при этом температуру выше температуры частиц) и радиацией из топки. Выделившиеся летучие реагируют с окислителем в газовой фазе, твердый остаток — в гетерогенном режиме [33–35].

Продолжительность стадии горения коксового остатка (после завершения выхода летучих) оказывается наиболее длительной из всех предшествующих стадий, может составлять до 90 % всего времени, необходимого для полного сгорания. Скорость горения угольной частицы зависит от скорости подвода окислителя к реакционной поверхности (наружной и внутривспоровой) и скорости самой гетерогенной химической реакции, протекающей на поверхности частицы.

В *кинетической* области горения скорость процесса  $K_k$  определяется скоростью самой химической реакции  $k$ :  $K_k = k \cdot C_i$ , где  $C_i$  — текущее значение концентрации одного из реагирующих веществ (углерода или кислорода). В этой области горения:

- с повышением температуры газовой среды в топке (в зоне активного горения) снижается относительная доля времени выделения и выгорания летучих;
- предварительная термообработка бурого угля сокращает время выделения летучих в процессе формирования газового факела; длительность воспламенения частиц полукокса (ирша-бородинский уголь) на 15–20 % превышает длительность воспламенения частиц исходного угля такого же размера;
- с уменьшением размера частиц:
  - снижается время горения их коксового остатка одновременно возрастает время индукции, затрачиваемое на подготовку воспламенения;

- установлена квадратичная зависимость длительности выхода летучих от размера частицы.

В *диффузионной* области скорость горения лимитируется условиями подвода воздуха к реакционной поверхности частицы и характеризуется коэффициентом диффузионного обмена  $a_{\text{диф}}$ :  $K_d = a_d \cdot C_i$ . В диффузионной области скорость горения практически не зависит от свойств топлива и температуры, но с увеличением относительной скорости газового потока и уменьшением размера частиц, увеличением ее пористости, то есть с ускорением доставки окислителя к реагирующей поверхности, скорость диффузионного горения увеличивается. Условием правильной организации факельного сжигания является обеспечение каждой частицы топлива в зоне горения необходимым количеством воздуха для полного ее сгорания. Вместе с тем для двухфазных систем оптимальные условия воспламенения обеспечиваются при неравномерном распределении воздуха и топлива по сечению начального участка факела с формированием отдельных зон с оптимальным составом топливоздушнoй смеси, которые выполняют функции локальных микроочагов и катализаторов воспламенения всего объема смеси.

Установлено, что кинетическая область горения угольных частиц характерна только для очень мелких частиц. Крупные частицы пыли бурых углей горят в области, близкой к диффузионной, пыль антрацитов, тощих и каменных углей обычного помола горит в промежуточной области [21].

### *9) Особенности горения пылевых частиц в полидисперсном факеле*

В пылеугольном факеле частицы пыли различного размера горят не отдельно друг от друга, а в условиях, создаваемых горением всех частиц, во взаимодействии. Поэтому горение полидисперсной угольной пыли рассматривается как параллельное выгорание частиц различного размера в пылевоздушном потоке. Разогрев мелких частиц (10–40 мкм) за счет интенсивной теплоотдачи воздушной среде при излучении из топки осуществляется замедленно, несмотря на большую тепловоспринимающую поверхность частицы. Однако рециркуляция топочных газов и повышение температуры газовой смеси, окружающей частицы угля, может существенно ускорить воспламенение и выгорание частицы. Горение крупных частиц пыли

(более 100 мкм) в смеси с умеренными избытками воздуха переходит после начального воспламенения в диффузионный режим, что снижает скорость горения по сравнению с горением мелких частиц в кинетическом режиме.

Полидисперсность пыли учитывается при расчете горения путем выделения суммарных характеристик горения полидисперсности в основные уравнения горения топлива [33].

Процессы горения мелких и крупных частиц по-разному реагируют на условия протекания процесса:

- при больших избытках воздуха горение крупных частиц, протекающее в диффузионной области, *интенсифицируется*, горение мелких частиц замедляется;
- при малых избытках воздуха ( $\alpha = 0,3–1,3$ ) за счет усиления нагрева газовой среды процесс горения мелкой пыли (в кинетической области) интенсифицируется, скорость горения крупных частиц оказывается несколько меньше [34].

#### 10) Специфические условия воспламенения и горения энергетических углей

Характер процесса горения пылеугольных частиц — кинетическая или диффузионная области — определяется следующими основными факторами:

- размер угольных частиц;
- выход летучих для данного топлива;
- реакционные свойства данного топлива.

Кинетическая область горения характерна только для очень мелких угольных частиц. Пыль антрацитов, тощих и каменных углей горит в промежуточной области. Крупные частицы пыли бурого угля горят в области, близкой к диффузионной. Различие кинетических условий воспламенения и горения угольной пыли определяется реакционными свойствами топлива — энергией активации (табл. 2.3) [16].

Таблица 2.3

**Кинетические характеристики углей**

Вид топлива	Энергия активации $E$ , кДж/моль	Предэкспоненциальный множитель $k_0$ , м/сек
Антрацит	140	$4,5 \cdot 10^4$
Каменный уголь	126	$1,9 \cdot 10^4$

С учетом особой роли выделения и воспламенения летучих в горении углеродных частиц топлива очевидно, что условия воспламенения пылевоздушной смеси определяются в значительной мере таким свойством топлива, как выход летучих (рис. 2.2) [36].

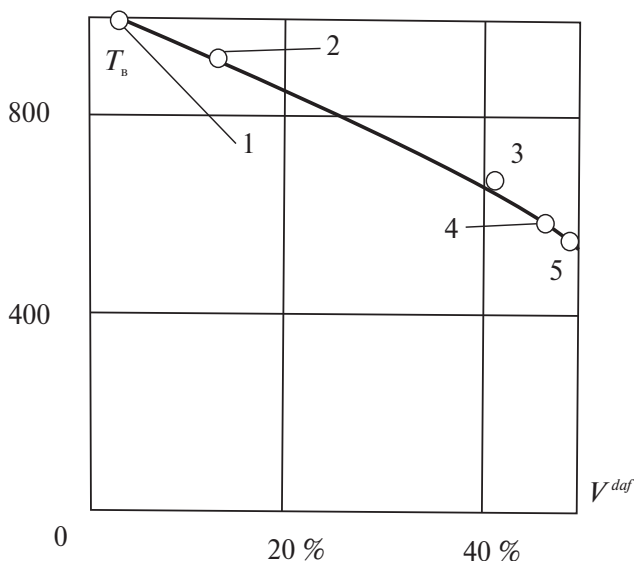


Рис. 2.2. Влияние выхода летучих на температуру воспламенения пылевоздушной смеси для различных углей

1 — донецкий антрацит, 2 — донецкий тощий, 3 — челябинский бурый, 4 — богословский бурый, 5 — подмосковный бурый

### 11) О причине механического недожога при факельном сжигании угольной пыли

При анализе эффективности процессов сжигания угольной пыли важно ответить на вопросы: как формируется неполнота сгорания в угольном факеле, какова природа механического недожога. С самого начала освоения факельного сжигания угля выдвигались различные соображения о причинах механического недожога [36]:

- угольная пыль неполностью выгорает в топке вследствие несовершенства смесеобразования в горелках и плохой аэродинамики факела, в результате образуются зоны, где концентрация окислителя недостаточна; при этом недожог представляет частицы коксового остатка с небольшим содержанием летучих;

- основная причина механического недожога заключается в выносе из топки невоспламенившихся частиц угля в исходном состоянии или подвергшихся термической обработке; причина тому — пребывание этих частиц в относительно холодных слоях топочных газов, где температура была недостаточна для воспламенения угольной пыли;
- при низкотемпературном горении угольных частиц и догорания коксовых остатков за счет первоначального выгорания наиболее активной части топлива ухудшаются реакционные свойства остатка, скорость горения по длине факела уменьшается;
- возможной причиной недожога называлась неоднородность состава углеродной массы угля, наличие в нем химически инертных, первично окисленных компонентов, которые и определяют механический недожог;
- наконец, усматривалась причина недожога в агрегатировании — сплавлении и слипании отдельных горящих пылевых частиц, в результате чего часть топлива может оказаться заплавленной золой, препятствующей горению углерода.

Можно утверждать вероятность одновременного проявления различных механизмов формирования недожога в пылеугольной топке. Развитие научных исследований, накопление опыта эксплуатации различных топочных устройств на различных видах топлива дают возможность выделять приоритетные факторы неполного сгорания пылеугольных частиц, которые будут различны в зависимости от способа сжигания, конструкции топочного-горелочного устройства и, прежде всего, качества топлива в исходном состоянии и после подготовки его к сжиганию (размол, подогрев). В каждом конкретном случае необходимо изучать характер носителей недожога — структуру частиц с повышенным содержанием углерода и по ней устанавливать характер процесса в топке, определивший недожог.

## **2.5. Формирование теоретической базы подавления оксидов азота в топочных процессах**

---

Одним из определяющих факторов в развитии технологии сжигания энергетического топлива явились постоянно ужесточающиеся нормативные и законодательные ограничения экологического ха-



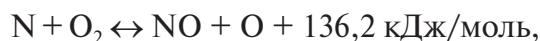
рактера. Если в начальной стадии развития отечественной энергетики проблемы защиты окружающей среды сводились к ограничению выбросов золы, объема водопотребления, то уже в 60–70-х гг. потребовалось принципиально изменить подход к созданию и развитию тепловых электростанций. К концу XX в. была сформулирована и пропагандировалась идеология «устойчивого развития» общества. В соответствии с этим отечественное законодательство и международные обязательства, мировой энергетический рынок, деятельность отечественных природоохранных государственных и общественных структур выдвинули на первый план задачу экологизации энергетики.

Среди наиболее сложных и актуальных проблем обеспечения экологической безопасности ТЭС выделяется задача снижения выбросов оксидов азота, образующихся в факеле в зависимости не только от свойств топлива, но в большей степени от технологии сжигания, ведения топочного режима. К настоящему времени сформулированы основные теоретические положения, характеризующие механизмы образования оксидов азота в топке [10; 37–41]. Образование оксидов азота в топочном процессе происходит при окислении азота воздуха («воздушные» или «тепловые» оксиды) и окислении азота топлива «топливные» оксиды). В результате образуются различные оксиды азота: NO — оксид азота (на долю которого приходится до 95 % общего выхода оксидов в топке), NO<sub>2</sub> — диоксид азота, N<sub>2</sub>O — закись азота.

### 1) Окисление азота воздуха

Принято выделять три основных механизма окисления азота воздуха:

– термический (тепловой) — механизм Зельдовича — непосредственное окисление азота кислородом воздуха в высокотемпературных зонах; заключается в реакции атомарного кислорода с молекулярным азотом воздуха и последующих реакциях с участием атомарного азота:



- быстрый (механизм Фенимора) «prompt» — через реакции молекулярного азота воздуха с углеводородными радикалами;
- через  $N_2O$  как промежуточное вещество.

Основные факторы, способствующие окислению азота воздуха:

1. Температура в зоне горения

В связи с высокой энергией активации реакция образования NO происходит при высоких температурах (выше  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). С увеличением температуры происходит экспоненциальный рост образования NO.

2. Время пребывания в зоне горения.

С увеличением времени пребывания продуктов сгорания топливо-воздушной смеси (в том числе, промежуточных продуктов) в зоне максимальных температур факела, характеризующей темпом охлаждения факела в зоне максимальных температур, выход оксидов азота увеличивается.

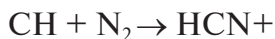
3. Избыток воздуха в факеле — концентрация кислорода и азота в топливо-воздушной смеси.

Зависимость выхода NO от избытка воздуха в диффузионном факеле имеет экстремальный характер. Значение экстремального коэффициента воздуха  $\alpha_{кр}$ , соответствующего наибольшему выходу оксидов азота, зависит от вида топлива, способа организации и структуры факела. При  $\alpha < \alpha_{кр}$  увеличение в смеси свободного кислорода способствует интенсификации окисления азота воздуха, возрастанию равновесной концентрации NO; при  $\alpha > \alpha_{кр}$  более существенным становится снижение максимальной температуры факела за счет охлаждения его ядра избыточным воздухом. При кинетическом горении (сжигание идеально перемешанных смесей топлива и воздуха)  $\alpha_{кр} = 1$ ; в диффузионном факеле по мере ухудшения смесеобразования значение  $\alpha_{кр}$  возрастает.

## 2) Образование топливных оксидов азота

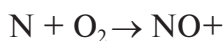
Топливные оксиды азота, согласно современным представлениям, получаются из азотсодержащих соединений угля на начальном участке факела при достижении температуры  $900\text{--}1000\text{ K}$  с выделением летучих азотсодержащих соединений, радикала  $CH$ . Эти процессы происходят по различным механизмам в бескислородной зоне и в окислительной среде.

Когда в реакционной среде существует недостаток окислителя, образуются быстрые оксиды азота. В основе их образования лежат следующие реакции:



При сжигании угля радикалы  $\text{CH}$  образуются в основном в процессе горения летучих компонентов, образовавшихся в результате термической деструкции.

*В окислительной среде* превращения топливного азота происходят по реакциям:



Степень перехода связанного азота топлива в зависит от следующих факторов:

1. Температура в зоне горения.

Температура факела влияет на образование «топливных» окислов в меньшей степени, чем в процессе окисления азота воздуха. Влияние осуществляется косвенным путем через скорость газификации топлива в начальном участке факела — чем выше скорость выделения летучих (в том числе, азотосодержащих — негорючих), тем меньше избыток воздуха в зоне выделения летучих за счет незавершенности процесса смесеобразования и тем меньше выход «топливных» окислов.

2. Избыток воздуха в факеле.

Величина избытка воздуха в начальном участке факела (в зоне наиболее интенсивного образования  $\text{NO}_x$ ) при сжигании азотосодержащих топлив является наиболее существенным фактором. Зависимость  $C_{\text{NO}_x} = f(\alpha)$  (так же как и при окислении азота воздуха) является экстремальной — превышение  $\alpha_{\text{кр}}$  приводит к снижению температуры в зоне обратных токов, обеспечивающих подогрев частиц топлива, и смешению зоны газификации, выделения азотных соединений топлива в область с повышенным избытком воздуха, при этом решающим становится снижение температурного уровня процесса.

3. Содержание связанного азота в топливе.

Степень перехода связанного азота топлива в  $\text{NO}_x$  зависит от содержания азота в исходном топливе — чем выше  $N^t$ , тем ниже степень конверсии азота, но выше общий валовый выход  $\text{NO}_x$ .

#### 4. Вид азотосодержащих соединений.

С увеличением степени метаморфизма твердого топлива не только отмечается снижение содержания связанного азота, но также возрастает доля наиболее устойчивых азотных соединений, поэтому для торфов, бурых углей степень конверсии азота является наибольшей. Для полукоксов степень перехода связанного азота в  $\text{NO}_x$  не превышает 10–12 %, поскольку наименее термостойкие азотные соединения выделены в процессе полукоксования. Наименьшая степень конверсии азота топлива отмечена для антрацитов.

## Литература к главе 2

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М. : Физматгиз, 1948.
2. Вулис Л. А., Ярин Л. П. Тепловые задачи теории газового факела // Материалы Второго всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка, 1969.
3. Семенов Н. Н. Цепные реакции. М. : Госхимиздат, 1934.
4. Семенов Н. Н. Развитие теории цепных реакций и теплового воспламенения. М. : Знание, 1969.
5. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов // Успехи физических наук. 1940.
6. Арсеев А. В. Сжигание природного газа. М. : Metallurgizdat, 1963.
7. Хзмалян Д. М. Теория топочных процессов. М. : Энергоатомиздат, 1990.
8. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре [и др.]. М. ; Л. : Энергия, 1966.
9. Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П. Основы теории газового факела. Л. : Энергия, 1968.
10. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации в газах. М. : Изд. АН СССР, 1944.
11. Зельдович Я. Б., Садовников П. Я., Франк-Каменецкий Д. А. Окисление азота при горении. М. ; Л. : Изд. АН СССР, 1947.
12. Иост В. Горение и взрывы в газах. М. : Изд. ин. лит., 1952.
13. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М. : Госэнергоиздат, 1959.
14. Льюис Б., Эльбе Г. Горение пламя и взрывы в газах. М. : Изд. ин. лит., 1948.

15. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения. М. : Госэнергоиздат, 1959.
16. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М. : Изд. МГУ, 1957.
17. Хотел Г. Диффузионное горение ламинарных и турбулентных струй // Вопросы горения и детонационных волн : сборник. М. : Оборонгиз, 1958.
18. Щетинков Е. С. Физика горения газа. М. : Наука, 1965.
19. Вулис Л. А. Тепловой режим горения. М. : Госэнергоиздат, 1954.
20. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. М. : Изд. АН СССР, 1958.
21. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М. : Изд. АН СССР, 1958.
22. Основы практической теории горения / В. В. Померанцев [и др.]. Л. : Энергия, 1973.
23. Теория топочных процессов/под редакцией Г. Ф. Кнорре, И. И. Палеева. М. ; Л. : Энергия, 1966.
24. Палатник И. Б., Темирбаев Д. Ж. К расчету траектории осесимметричной струи в сносящем потоке // Теория и практика сжигания газа : сб. 1968. Ч. IV.
25. Рабочий процесс и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей / А. И. Михайлов [и др.]. М. : Оборонгиз, 1959.
26. Ахмедов Р. Б., Цирульников Л. М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. Л. : Недра, 1984.
27. Некоторые особенности процесса смешения закрученных газовых струй и их систем с поперечным потоком / Л. Е. Гневанова [и др.] // Теплоэнергетика. 1998. № 12.
28. Аверин Л. В., Кондрашков Ю. А., Томилин В. П. Влияние поперечного сносящего потока на характеристики турбулентной струи // ИФЖ. 1990. № 2.
29. Баскаков А. П., Антикайн П. А. Изучение перемешивания в факеле горелки ОРГРЭС на модели // Труды УПИ № 76. Свердловск, 1960.
30. Устименко Б. П., Каймирасова С. Д. Влияние начальной крутки внутреннего и внешнего потоков на аэродинамику сложной коаксиальной струи // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики : сборник Алма-Ата : Наука Каз.ССР, 1973.
31. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М. : Энергоатомиздат, 1986.

32. Миронов С. Н. Организация и регулирование режимов камерного сжигания угольной пыли. М. : Энергия, 1972.
33. Турбулентное смешение газовых струй / под ред. Г. Н. Абрамовича. М. : Наука, 1974.
34. Баскаков А. П. Стабилизация воспламенения и выгорание полидисперсной пыли в факеле // Третье Всесоюзное совещание по теории горения. М. : Изд. АН СССР, 1960. Т. 2.
35. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. М. : Энергия, 1978.
36. Хотел Г. Диффузионное горение ламинарных и турбулентных струй // Вопросы горения и детонационных волн : сб. научных трудов. М. : Оборонгиз, 1958.
37. Оренбах М. С., Кузнецов А. П. Изучение природы механического недожога в топках котельных агрегатов // Горение твердого топлива : Материалы III Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1964. С. 181–191.
38. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. М. : Госэнергоиздат, 1977.
39. Лавров Н. В., Розенфельд Э. И., Хаустович Г. П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. М. : Энергия, 1981.
40. Котлер В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М. : Энергоатомиздат, 1987.
41. Волков Д. В., Зайцев С. А. Исследование образования  $\text{NO}_x$  при горении однородной метано-воздушной смеси // Проблемы сжигания углеводородных топлив : сб. научных трудов. М. : Энергоатомиздат, 1998.

---

### **3. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОГО БАЛАНСА ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ КАК ВАЖНЕЙШЕГО ФАКТОРА РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

---

**С**войства энергетического топлива оказывают влияние практически на все компоненты деятельности ТЭС. Конструкции топочных и горелочных устройств и сами технологии сжигания энергетического топлива, определяемые свойством используемых топлив, отражают непрерывную «борьбу» энергетиков с негативными свойствами этих топлив, качество которых существенно ниже установленных в мировой энергетике нормативов и требований.

#### **3.1. Динамика структуры топливоснабжения ТЭС в отечественной энергетике и соответствующее развитие технологии сжигания энергетических топлив**

---

Структура топливного баланса ТЭС определяется целым рядом факторов. Отечественная энергетика претерпела в XX в. неоднократные масштабные изменения структуры топливопотребления, охватывающие отрасль в целом.

### **3.1.1. Освоение торфа в процессе становления и развития отечественной энергетики**

Уже в самых первых проектах электрификации России (1915–1916 гг.) в состав топливной базы входили, прежде всего, местные топлива — торф, малоценные угли, древесина, сланцы. При этом учитывалась слабость транспортных связей для доставки качественных углей в центральные, промышленно развитые регионы страны. В частности, в 1915 г. рассматривалось предложение Г. М. Кржижановского о создании мощных районных электростанций с использованием для них огромных запасов торфа.

Эти положения были отражены в плане ГОЭЛРО (1920–1930 гг.). Для ускоренной реализации программы расширения использования торфа приходилось уже на действующих станциях преодолевать трудности сжигания торфа на подвижных механических решетках. Удалось обеспечить устойчивое горение торфа после длительных работ крупнейших отечественных ученых-топочников — Т. Ф. Макарьева, К. В. Кирша. Над решеткой со слоем торфа была выполнена шахта для предварительной подсушки топлива, впервые в мировой практике был применен подогрев дутьевого воздуха. Эти технические разработки стали классикой отечественной топочной техники. Они открыли возможность строительства крупных торфяных электростанций.

С 1923 по 1928 гг. доля торфа в топливном балансе ТЭС увеличилась с 13,1 до 41,1 %. За короткий период в 10 лет, когда торф оставался безусловно приоритетным энергетическим топливом, были сооружены Шатурская ГРЭС (под Москвой), ГРЭС «Красный Октябрь» (Ленинград), ГРЭС имени А. И. Рыкова (Свердловск). Позднее были созданы крупные паровые котлы на торфе, оснащенные пылесистемами для сжигания торфяной пыли. В этот период, предшествующий бурному энергетическому строительству в СССР, энергетика сложилась по преимуществу как энергетика на торфе.

### **3.1.2. Начало отечественной угольной энергетики**

Уголь является важнейшим компонентом топливного баланса мировой и отечественной энергетики [1; 2]. К началу 1930 г. началось ограничение использования торфа на ТЭС. Для сооружения крупных электростанций потребовались новые источники энергетического топлива. Торф же по объему и издержкам добычи, по удельным капитальным затратам на торфяных ТЭС не мог обеспечивать заданные масштабы



энергетического строительства, доля его в топливном балансе энергетики стала неуклонно сокращаться — к 1940 г. она снизилась до 20 %. К 1955 г. доля торфа не превышала 10 %. Для обеспечения мощного промышленного развития страны потребовалось форсировать добычу угля на традиционных угледобывающих объектах (Донбасс, Подмосковский угольный бассейн). Началось интенсивное освоение Кузнецкого угольного бассейна, местных месторождений Южного Урала, Караганды, Кизеловского, Черемховского бассейнов. К началу войны в стране уже сформировалась угольная энергетика.

В течение Великой Отечественной войны для компенсации утраченных источников топлива, оказавшихся на оккупированной территории, была организована добыча угля в полярных районах европейской части страны (Воркута, Инта), на Севере Урала (Волчанское месторождение).

К 1950 г. разрушенное войной шахтное хозяйство было практически полностью восстановлено, добыча угля вышла на уровень 205,7 млн т/год, а к 1965 г. — 441,3 млн т. Начиналось освоение новых мощных угольных месторождений — Экибастузского, Канско-Ачинского, наращивалась мощность Кузбасса. С учетом резко возросшей технической оснащенности энергомашиностроения это позволило приступить к строительству крупных угольных ТЭС на среднее, затем высокое давление.

### **3.1.3. Опыт перевода большой группы ТЭС на экибастузский уголь**

С начала 50-х гг. началась разработка крупнейшего на территории СССР Экибастузского угольного месторождения с промышленными запасами угля 7 млрд т, максимальная производительность добывающего комплекса составила до 150 млн т в год. Ресурсы сравнительно небольших угольных месторождений Урала (Волчанское, Богословское, Кизеловское, Буланашское, Коркинское, Еманжилинское) в значительной мере уже были исчерпаны и не могли обеспечить потребности всех существующих ТЭС — Среднеуральской ГРЭС, Красногорской ТЭЦ и др., а также планировавшихся крупнейших современных электростанций — Троицкой ГРЭС, Верхнетагильской ГРЭС, Серовской ГРЭС, Курганской ТЭЦ, Рефтинской ГРЭС, Омских ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5, большой группы ТЭЦ в северном Казахстане. Возможности угледобывающего комплекса Кузбасса, пропускная способность Транссибирской железнодорожной магистрали исключали возможность формирования мощного энергетического узла на базе

кузнечного угля. Поэтому именно Экибастуз должен был стать топливной базой энергетики Урала, Западной Сибири.

Перевод действующего оборудования электростанций этих регионов на такой трудный для освоения уголь — по условиям размола, сжигания, золоулавливания, золошлакоудаления — был завершен за четыре года.

В настоящее время на российских ТЭС используется ежегодно до 25 млн т экибастузского угля. По объему использования на ТЭС России этот уголь занимает одну из лидирующих позиций, наряду с кузнечным, канско-ачинским.

### 3.1.4. Канско-Ачинские угли в энергетике

Не менее сложной и драматичной стала проблема использования бурых углей Канско-Ачинского угольного бассейна в энергетике.

**Канско-Ачинский угольный бассейн** расположен в южной части Красноярского края, в Кемеровской и Иркутской областях. Площадь открытой части бассейна около 45 тыс. км<sup>2</sup>. Общие геологические запасы углей более 600 млрд т, в том числе пригодных для разработки открытым способом — 140 млрд т. Канско-Ачинский угольный бассейн, содержащий 78 % всех запасов бурых углей России, должен сыграть важную роль в совершенствовании структуры энергетического баланса европейской части России, Урала, Сибири и Дальнего Востока. Канско-Ачинский уголь остается самым дешевым в России. Энергетической стратегией России предусматривается преимущественное развитие Канско-Ачинского угольного бассейна как наиболее эффективной топливной базы энергетики.

Сложилось многообразие технологий и оборудования для использования канско-ачинских углей с учетом различия состава их минеральной массы.

1. При разных способах эвакуации шлака из топки: в топках с жидким шлакоудалением (котлы БКЗ-220; БКЗ-320; БКЗ-420; П-49); в топках с твердым шлакоудалением (котлы Е-500; П-67; ПК-10; ПК-38).

2. С использованием различных систем пылеприготовления:

- разомкнутые (центральный пылезавод к блоку 500 МВт Назаровской ГРЭС);

- разомкнутые в пределах котельного агрегата (котел ст. № 5 БКЗ-320—140-ПТ-4 Иркутской ТЭЦ-6; котел ст. № 15 ТПЕ-427 Новосибирской ТЭЦ-3);

- полуразомкнутые (с газовой сушкой, с бункером пыли);

- с прямым вдуванием пыли:
  - с мельницами-вентиляторами и котлами с ТШУ (Е-500; П-67);
  - молотковыми мельницами и котлами с жидким шлакоудалением (БКЗ-220 ТЭЦ Юргинского машзавода; котлы ПК-38 Назаровской ГРЭС);
  - молотковыми мельницами, транспортом пыли через пылеконцентратор (котлы ст. № 19, 20 БКЗ-320—140-ПТ Красноярской ТЭЦ-1);
  - с молотковыми мельницами и прямым вдуванием при твердом шлакоудалении (котлы ПК-10, ПК-38 — Красноярская ТЭЦ-1, Красноярская ГРЭС-2).

Первоначально, еще до освоения Канско-Ачинского бассейна, разрабатывались обширные программы развития его как основной угольной базы энергетики страны: предусматривалось создание в зоне бассейна 4–6 гигантских ГРЭС единичной мощностью до 9000 МВт, суммарной мощностью 25000–30000 МВт, термохимическая переработка основной части угля на месте добычи с получением экологически чистых продуктов — буроугольного полукокса (удельная теплота сгорания — 27200–29300 кДж/кг), пиролизного газа (20950 кДж/кг), а также жидких химических продуктов (37700–41900 кДж/кг), то есть предусматривалось энерготехнологическое производство; масштаб добычи угля оценивался величиной до 700 млн т в год.

В силу целого ряда экономических и экологических причин эти ключевые положения долгосрочной Программы развития топливно-энергетического комплекса, сформированной в середине 70-х гг., не были реализованы. Результаты большого объема научно-исследовательских работ и потенциальные возможности Канско-Ачинского бассейна оказались в значительной мере не востребованными.

### **3.2. Газификация отрасли с вытеснением угля с ведущих позиций в топливном балансе ТЭС**

---

К началу XXI в. наша страна стала крупнейшим производителем и поставщиком природного газа. По мере развития газодобывающего комплекса нарастала доля природного газа в топливном балансе энергетики.

С 1955 г., когда доля угля в топливном балансе ТЭС достигла максимального значения за весь период развития отечественной энерге-

тики — 72,9 %, началось постепенное вытеснение угля с ведущих позиций. Снижение его доли к 1965 г. в энергетических топливах до 48,9 % сопровождалось значительным повышением доли мазута и газа в топливном балансе ТЭС в результате резкого нарастания добычи нефти и природного газа в Западной Сибири. Радикальное изменение технологии энергопроизводства в отечественной энергетике в период 1960—1990 гг. определила газификация отрасли.

Реальное использование природного газа на российских ТЭС началось с 1943 г., с открытием газовых месторождений вблизи Саратова. Здесь, в непосредственной близости от Сталинградского фронта, в разгар тяжелых боев, был проложен первый газопровод, который обеспечил подачу газа на Саратовскую ТЭЦ. В этом же году началось использование Бугурусланского месторождения, газ поступал на ТЭС и предприятия города Куйбышев (Самара).

Первым послевоенным пятилетним планом (1946—1950 гг.) предусматривалось «развивать в крупных масштабах новую отрасль промышленности — газовую промышленность на базе добычи природного газа и переработки угля, торфа и сланцев. Довести к 1950 г. производство газа из угля и сланцев до 1,9 млрд м<sup>3</sup> и природного газа до 8,4 млрд м<sup>3</sup>». Однако использование природного газа в энергетике как основного топлива могло состояться при условии достаточного объема выявленных запасов его, развитой сети магистральных газопроводов. Через 30 лет, к 1980 г., добыча природного газа достигала уже 400 млрд м<sup>3</sup>. Решающую роль в этом рывке сыграло освоение западносибирских месторождений (богатейшего газоносного региона мира), где первый газовый фонтан ударил в 1953 году. Проблема обеспеченности страны и энергетике газовым топливом была решена. Доля энергетике России в общем объеме потребления газа промышленным сектором страны составляет около 40 %.

Проблемы территориальной неравномерности распределения газовых месторождений России сглаживаются созданием мощной разветвленной газотранспортной системы, а также активным включением в эксплуатацию локальной значимости месторождений газа — Камчатки, шельфа Сахалина, Якутии.

Газификация отрасли осуществлялась в соответствии с решением высших правительственных органов (Совет Министров, Госплан), осуществляющих распределение газа дифференцированно по отраслям, регионам и отдельным крупным электростанциям. В первую очередь на газ переводились мазутные электростанции (с учетом нарастающего

дефицита мазута и роста его стоимости), угольные станции в крупных городах (с учетом экологических, социально-экономических и общественно-политических факторов, также надежности топливоснабжения) [3]. Осуществлялось строительство крупнейших ГРЭС на природном газе — Сургутские ГРЭС-1 (3200 МВт) и ГРЭС-2 (5600 МВт), перевод энергетики Центра страны на природный газ с полным вытеснением угля. Эти процессы достигли своего апогея к началу 90-х гг., когда доля газа в топливном балансе отрасли составляла около 68 %. В результате удалось повысить эффективность энергопроизводства за счет сокращения капитальных, эксплуатационных и транспортных затрат. Столь радикальное изменение структуры топливного баланса энергетики России было осуществлено за счет вытеснения мазута на газомазутных ТЭС, перевода ряда угольных ТЭС на сжигание газа путем реконструкции действующего оборудования, ввода новых генерирующих мощностей, изначально рассчитанных на природный газ.

Однако этим газификация энергетики страны не завершилась. Новый импульс газификация отрасли получила в связи с активным внедрением парогазовой технологии. Будут еще новые вводы генерирующих мощностей на природном газе, последует рост потребления природного газа на Востоке страны, куда прокладываются новые магистральные газопроводы, в том числе от новых месторождения. В настоящее время доля газа в структуре топливного баланса тепловых электростанций составляет около 70 %, доля угля — 28 %, мазута и нефтетоплива — менее 2 %. Газификация энергетической отрасли достигла своего разумного предела, сложившаяся ситуация неблагоприятна для обеспечения надежного энергоснабжения страны, национальной безопасности. Предполагается, что к 2030 году доля угля в структуре топливного баланса электростанций увеличится до 37 %.

### **3.3. Современные топливные ресурсы российской угольной энергетики**

---

Россия обладает обширной угольной сырьевой базой, уступая по их количеству только США. Разведанные запасы достигают 193 млрд т, предварительно оцененные запасы (категории C<sub>2</sub>) составляют 79,8 млрд т. Из этого количества почти половина (47,7 %) приходится на каменные угли и антрациты, остальное — на бурые угли.

Ресурсный потенциал страны также велик — прогнозные ресурсы угля оцениваются в 3,8 трлн т; по этому показателю Россия занимает второе место в мире после Китая. Однако наиболее достоверные ресурсы составляют около 539,3 млрд т, или 14,2 % суммарных [3].

Существенной особенностью российской сырьевой базы угольной промышленности является концентрация основных запасов в восточных районах страны. Около 80 % запасов сосредоточено в Сибири, главным образом в Кузнецком и Канско-Ачинском угольных бассейнах. В европейской части страны, где расположены основные потребители угольной продукции, находится всего 9,5 % разведанных запасов углей России, они сосредоточены в Печорском и Донецком бассейнах.

Сырьевая база угля России разнородна, в ней представлены угли всех типов.

Высоким качеством характеризуются угли Кузнецкого, Канско-Ачинского и Южно-Якутского угольных бассейнов. Восточный Донбасс и Печорский бассейн отмечаются сложным геологическим строением, большинство угольных пластов в них имеет малую мощность и залегает на большой глубине.

Треть запасов углей России не отвечает принятым в мировой практике кондициям по качеству (зольности и содержанию серы), мощности пластов, условиям их залегания, газо- и выбросоопасности; такие угли имеются в каждом бассейне [4; 5].

*В Кузнецком каменноугольном бассейне* на юге Западной Сибири, в Кемеровской области, являющемся главной сырьевой базой страны, сосредоточено более четверти разведанных запасов углей (51,5 млрд т). Значительная часть запасов находится в благоприятных горно-геологических условиях, позволяющих отрабатывать их как подземным, так и открытым способом. В бассейне насчитывается 9 млрд т запасов углей, представлен практически весь спектр марок каменных углей — от длиннопламенных до антрацитов. Угли Кузнецкого бассейна отличаются хорошими качественными характеристиками: содержание серы в основном низкое, в среднем 0,3–0,8 %, зольность также невысока — 10–16 %. Ресурсный потенциал бассейна огромен: здесь локализовано более 40 % российских ресурсов наиболее изученной категории (223 млрд т), являющейся ближайшим резервом наращивания запасов. На долю Кузбасса приходится 60 % суммарной добычи угля в России и 80 % экспорта российского угля.

*В Канско-Ачинском бурогоугольном бассейне* крупные запасы угля сконцентрированы на территории Кемеровской и Иркутской областей и Красно-



ярского края. Бассейн содержит около 41 % российских разведанных запасов угля, почти 99 % его — бурый уголь. Пласты залегают на небольшой глубине, их мощность достигает на некоторых месторождениях 70–100 м. Качество углей бассейна в целом высокое (среднее содержание серы — 0,3–1 %, зольность — 6–15 %). Наиболее крупные разрабатываемые месторождения — Березовское, Бородинское, Назаровское.

Почти все добываемые в бассейне угли используются для нужд энергетики. Неоспоримыми преимуществами канско-ачинских углей являются дешевизна, низкая зольность, малое содержание токсичных микроэлементов. Разработка ряда эффективных технологий удаления и переработки золошлаков канско-ачинских углей позволяет осуществить полную утилизацию золошлаков с получением на их основе ряда ценных продуктов, реализовать идею «безотвальной» ТЭС.

Перспективы расширения сырьевой базы угля в бассейне велики, его прогнозные ресурсы достигают 327,4 млрд т.

*Минусинский каменноугольный бассейн*, расположенный главным образом в Хакасии, включает около 5 млрд т запасов углей хорошего качества, с высокой теплотворной способностью, малосернистых, среднезольных. Средняя мощность угольных пластов месторождений Минусинского бассейна невелика: 0,8–10,3 м, но основная их часть залегает на небольшой глубине, что делает их пригодными для открытой разработки. Свойства углей, благоприятные условия их залегания и удобное географическое положение придают им большую промышленную ценность. Ресурсный потенциал бассейна невелик (15 млрд т).

*Южно-Якутский бассейн* — в его пределах разведано 4,5 млрд т каменных углей, или 2,3 % российских, а прогнозные ресурсы достигают 47,3 млрд т. Угли бассейна отличаются высоким качеством — низкой зольностью (10–18 %), малым содержанием серы (0,3–0,4 %) и высокой теплотой сгорания. Положено начало в создании новых центров угледобычи. В Южной Якутии завершен один из самых сложных и важных этапов в реализации проекта по освоению Эльгинского месторождения, построена железная дорога протяженностью 321 км, введен в эксплуатацию пусковой комплекс Эльгинского разреза, в августе 2011 г. добыты первые тонны угля. В создание одного из самых перспективных объектов экономики всего Дальнего Востока вложено более 1,5 млрд долларов США.

Остальные запасы углей России локализованы в бассейнах меньшего масштаба или отдельных месторождениях, среди которых выделя-



ется Харанорское бурогольное месторождение в Забайкальском крае с разведанными запасами 783 млн т (0,4 % российских). Для него характерны высокое качество углей, благоприятные горно-геологические (мощность пластов достигает 30–40 м) и гидрогеологические условия отработки. Основная часть углей извлекается в Кузнецком, Канско-Ачинском, Минусинском, Иркутском, Печорском и Южно-Якутском угольных бассейнах, обеспечивающих почти 84 % добычи угля.

По добыче углей Россия находится на шестом месте в мире после Китая, США, Индии, Австралии и Индонезии; на ее долю приходится менее 5 % мирового производства.

*Экибастузский угольный бассейн*, оказавшийся за рубежами России, остается важным источником снабжения отечественной энергетики углем. Для топливоснабжения большой группы крупных электростанций Урала и Западной Сибири импортируется экибастузский уголь из Казахстана, который поступает на ТЭС Свердловской области — до 15–16 млн т ежегодно, Омской области — около 4 млн т, Челябинской области — до 6 млн т.

В общем объеме потребления доля импортного энергетического угля в последние годы составляла около 20–25 %. Доля углей различных месторождений показана на рис. 3.1. Совокупная доля кузнецкого, канско-ачинского и экибастузского угля достигает 60 % в объеме поставок на ТЭС.

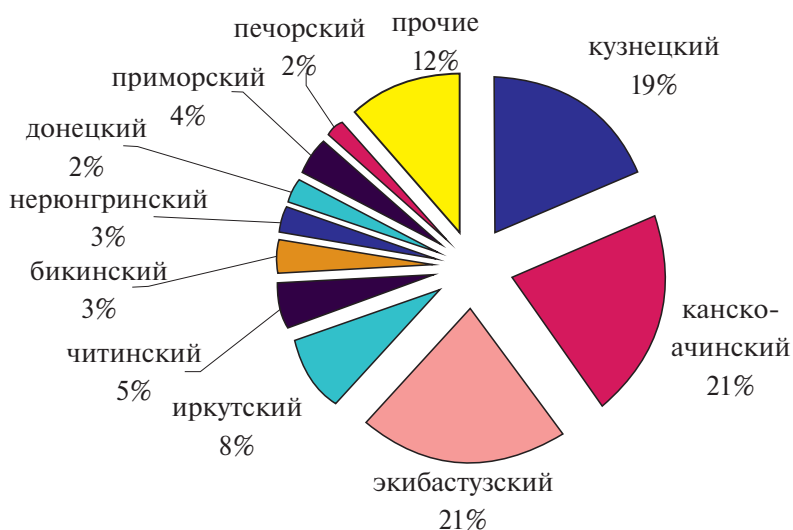


Рис. 3.1. Структура поставок угля различных месторождений на ТЭС России в 2011 г.

Переработка угля в России ведется в небольших масштабах, главным образом из-за нехватки соответствующих мощностей. В 2014 г. объем обогащения энергетических углей находился на уровне 27 %. Доля перерабатываемого топлива постепенно растет, поскольку этот сегмент отрасли быстро развивается. Однако весь обогащенный энергетический уголь поступает на экспорт.

### 3.4. Перспективы потребления угля и условия снабжения углем российской энергетики

В соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 г.» к концу рассматриваемого периода предполагается увеличить долю угля в топливном балансе ТЭС до 34 %. Это связывается с предполагаемым вводом новых объектов угольной генерации и модернизации существующих угольных ТЭС (рис. 3.2) [6; 7]. В мировой энергетике в последние несколько лет настойчиво проявляется тенденция роста доли угля в потребляемом топливе.

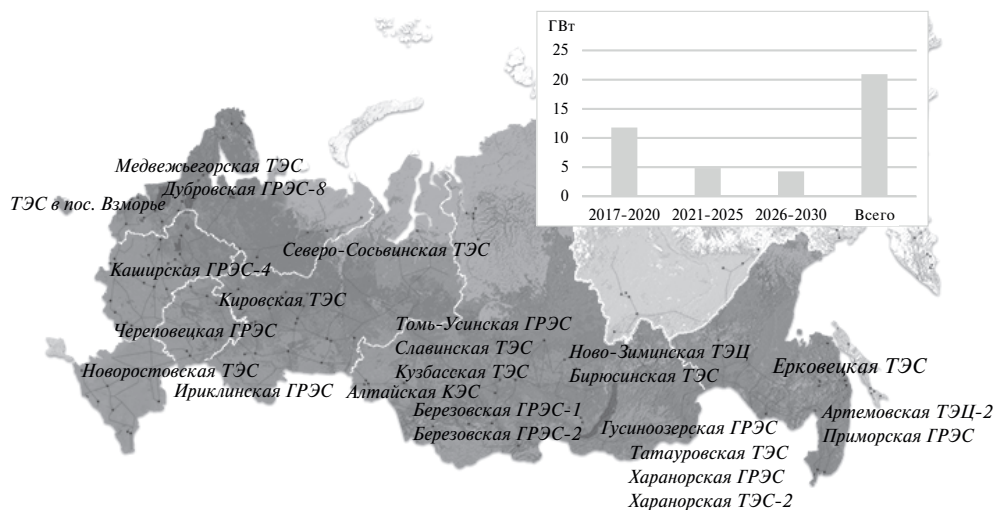


Рис. 3.2. Схема размещения новых и реконструируемых угольных ТЭС в соответствии со «Схемой территориального планирования в области энергетики на период до 2030 года» [3]

Однако реальные экономические условия развития угольной генерации в России не подтверждают реальность прогнозов и намерений на увеличение доли угольной генерации в период до 2030 г.

Уже к концу XX в. существенно изменилась ситуация в топливоснабжении многих ТЭС. В первую очередь выделяются следующие факторы:

1. Геополитические изменения, связанные с распадом союзного государства, привели к тому, что значительная часть добывающих районов (в частности, Экибастузский, Карагандинский угольные бассейны) оказалась за рубежом.

2. Ужесточение экологических требований по выбросам золы, затруднения с организацией золошлакоотвалов взамен отработанных, соображения энергетической и экологической безопасности, надежности поставки угля.

3. Изменение общественно-политического строя и соответствующих хозяйственных отношений в России принципиально изменили условия топливоснабжения отдельных ТЭС и отрасли в целом. Основным фактором в этих изменениях послужило формирование внутреннего топливного рынка, соотношение цен на различные виды топлива.

4. Открытый доступ на мировые топливные рынки привел к оттоку в Европу, в последние годы и в Юго-Восточную Азию, значительной части добываемого газового топлива и угля. В 2010 г. объем экспорта энергетического угля сравнялся с объемом поставки на российские ТЭС. Уже в 2011 г. заметно его превзошел. Экспорт энергетического угля стал крупнейшим сектором потребления российских энергетических углей. При этом за последние 25 лет внутреннее потребление угля сократилось более чем на 40 %, а экспорт угля с 1997 г. вырос почти в 6 раз.

5. Высококачественные угли Кузнецкого, Нерюнгринского бассейнов вывозятся за рубеж, поэтому, несмотря на существенное увеличение добычи угля, качество поставляемого на ТЭС угля от этих месторождений ухудшилось.

6. Объемы обогащения энергетических углей за последние годы имеют устойчивую тенденцию роста — в 2014 г. доля обогащаемого энергетического угля составил 27 %. Однако весь обогащенный уголь направляется на экспорт.

7. Угольная энергетика России остается крупнейшим потребителем низкокачественных энергетических углей, существующие ТЭС

в массе своей могут без труда переходить на сжигание малозольного, малосернистого, маловлажного угля.

8. При наличии всех атрибутов рыночной экономики действие рыночных механизмов в определенной мере регулируется государством, которое в целом контролирует макроструктуру топливного баланса энергетики, особенно в газовой сфере.

9. Существенное значение придается вопросам энергетической безопасности и энергетической независимости страны. По этим соображениям долгосрочными программами развития отрасли предусматривается ограничение доли природного газа в топливном балансе энергетики.

10. Несмотря на присутствие государства в формировании ценовой политики на топливные ресурсы ситуация с ценами на природный газ, уголь складывается неблагоприятной для энергетики, прежде всего из-за соотношения внутренних цен на уголь и природный газ. При сложившемся ценовом соотношении газ/уголь угольный киловатт становится дороже газового. Начиная с 2009 г. внутренняя цена на природный газ в России выше, чем в США. Поэтому неудивительно, что стоимость электроэнергии в России после 2010 г. выше, чем в США, что замедляет экономический рост промышленности и страны в целом.

10. Можно ожидать значительные сдвиги в топливоснабжении ТЭС в будущем в связи наращиванием добычи природного газа в восточных районах страны, на шельфе, а также возрастанием конкуренции на мировом рынке топливно-энергетических ресурсов с выходом на арену сланцевого газа, развитием системы магистральных газопроводов Юг — Запад без участия России.

Наряду с отмеченными выше тектоническими сдвигами в структуре топливопотребления отрасли развивались (как и во весь период ее существования) локальные процессы перестройки структуры топливного баланса отдельных ТЭС, отдельных энергообъединений.

Эти процессы определяют необходимость решения следующих организационных, технологических и экологических задач:

- замещение экибастузского угля (перешедшего в категорию импортируемого топлива) на угли восточных угледобывающих бассейнов России: каменные — кузнецкий, бурые — канско-ачинский, березовский, ирша-бородинский, харанорский, азейский;
- стабилизация потребления природного газа на уровне 60–62 % в общем потреблении энергетических топлив;

- рационализация сжигания в системе распределенной энергетики местных низкопотенциальных топлив, практически не содержащих минеральные вещества (торф, древесина и отходы деревообработки);
- сжигание непроектных топлив на действующем оборудовании;
- сжигание смесей различных углей;
- использование в качестве топлива отходов добывающих отраслей (нефтекокс, попутные нефтяные газы, технологические газы, шахтный метан) промышленных и бытовых твердых отходов;
- форсированное освоение новых технологий использования твердого топлива — создание угольных парогазовых установок различных модификаций.

### **3.5. Газовые ресурсы российской энергетики**

---

Несмотря на прогнозы об истощении запасов природного газа рост его добычи постоянно нарастает в России, также и мировая добыча природного газа постоянно растет. Тем не менее, сохраняются определенные ограничения потребления природного газа для энергетики как в России, так и за рубежом. Это обеспечивается системой квотирования, ценовой политикой на отдельные виды энергоресурсов. Если экспорт газа в Европу будет сокращаться (в соответствии с намерениями стран ЕС ограничить либо полностью исключить импорт российского газа), то естественно, он будет переориентирован на Восток (Китай, Южная Корея) и частично выйдет на внутренний рынок, способствуя развитию парогазовых технологий.

Большие перспективы развития газовой отрасли связаны с востоком России. Здесь сосредоточено 27 % всех начальных суммарных ресурсов газа страны, что составляет более 67 трлн м<sup>3</sup>. Из них общие начальные суммарные ресурсы суши востока России составляют более 52 трлн м<sup>3</sup>, а шельфа прилегающих морей — еще почти 15 трлн м<sup>3</sup>. В дальнейшем ставится задача сформировать в России четыре новых крупных газодобывающих центра — Сахалинский (72 млрд м<sup>3</sup>), Якутский (52 млрд м<sup>3</sup>), Иркутский (35 млрд м<sup>3</sup>) и Красноярский (35 млрд м<sup>3</sup>), которые к 2030 г. смогут обеспечить добычу до 200 млрд м<sup>3</sup> газа в год. На Камчатке намечается развитие газоснабжения до 20 млрд м<sup>3</sup> (с учетом шельфа).

Интенсивное развитие экономики Востока России и выход на топливные рынки АТР связываются с прокладкой крупнейшего маги-

стрального газопровода «Сила Сибири», ориентированного, прежде всего, на транспортировку газа в Китай. По его трассе будет осуществляться газификация промышленных объектов и энергетики.

Неравномерность потребления природного газа (суточная, сезонная) сглаживается накопленными значительными объемами газа в подземных газохранилищах. На территории России функционируют 26 объектов подземного хранения газа с объемом оперативного резерва 65,2 млрд м<sup>3</sup>.

### **3.6. Влияние мировых топливных рынков на формирование топливного баланса российской энергетики**

---

Энергетика была всегда внутренней хозяйственной сферой государства. Однако, по мере развития факторов глобализации мировой экономики, формирования мировых рынков энергоресурсов, энергии и энергооборудования, создания транснациональных энергетических альянсов, каждая национальная энергетика все в большей мере выступает как компонент мирового энергохозяйства и все больше испытывает в своем развитии влияние процессов в мире.

В 70-х гг. прошлого века мировая экономика переживала тяжелейшее потрясение в связи с нефтяным кризисом, потребовалось в короткий срок переориентировать и сферу потребления на позиции энергосбережения, и энергетику на альтернативные топлива, предельно сократив потребление нефтепродуктов. Начиная с середины 2010 г. происходит стремительное изменение ситуации на топливном мировом рынке, сначала газовом, а затем и угольном. Еще недавно все прогнозы развития энергетических отраслей строились в основном исходя из предположений постоянного превышения спроса над предложением энергоносителей. И если ранее в любых сценариях — оптимистических или пессимистических — МЭА прогнозировало опережающий рост мирового потребления угля, то сегодня ситуация неоднозначна. Сложились новые мировые тенденции, которые рассматривались на совещании ведущих угольных экспертов в совете по углю при Международном энергетическом агентстве в ноябре 2012 г. в Париже [2]. Наиболее значимым внешним фактором для положения в российской

энергетике является резкое падение цены на нефть, при этом внутренние цены на нефтепродукты только повышаются.

К началу XXI в. сложилось благоприятное для России положение на мировом и европейском топливных рынках. Особенно значима роль России в поставках природного газа на экспорт, который доходил до 200 млрд м<sup>3</sup>. Были построены мощные трансконтинентальные газопроводы.

Однако уже к 2012 г. положение начало решительно меняться. Бурное, непрогнозируемое появление сланцевого газа как реальной альтернативы природному газу, намерение стран Европейского Союза отказаться полностью от российского газа, кардинальное изменение позиций США на топливном рынке за счет добычи сланцевой нефти и газа заставили пересмотреть некоторые перспективы развития энергетических ресурсов мирового масштаба и региональных проблем развития энергетики.

**Сланцевый газ** — природный газ, добываемый из горючих сланцев, который состоит преимущественно из метана. Выход сланцевого газа составляет от 1,0 до 4,0 л на тонну сланцев. Ресурсы сланцевого газа в мире составляют 200 трлн м<sup>3</sup>. В числе факторов, положительно влияющих на перспективы добычи сланцевого газа:

- близость месторождений к рынкам сбыта;
- значительные запасы;
- заинтересованность ряда стран в снижении зависимости от импорта топливно-энергетических ресурсов.

В то же время у сланцевого газа есть ряд недостатков, негативно влияющих на перспективы его добычи в мире. Среди таких недостатков: относительно высокая себестоимость; непригодность для транспортировки на большие расстояния; быстрая истощаемость месторождений; низкий уровень доказанных запасов в общей структуре запасов; значительные экологические риски при добыче. Для организации его добычи требуется отчуждение обширных территорий, выполнение большого количества скважин.

Одновременно с добычей газа растет и добыча нефти на тех же месторождениях. Добыча сланцевой нефти началась чуть позже, и ее бурный рост стал сюрпризом для рынка. Добыча нефти в США выросла с 7 млн баррелей в сутки в 2008 г. до более чем 12 млн баррелей в сутки в 2012 г. В конечном счете произошло радикальное изменение структуры топливного рынка, выход новых игроков в лидеры, резкий спад цен на нефть, природный газ.



По оценке экспертного сообщества Мирового энергетического совета пик потребления угля закончится к 2020 г., и затем начнется эволюционное снижение, так как новые технологии добычи газа и нефти могут получить широкое развитие в мире. Главное условие стабилизации потребления угля в выработке электроэнергии — обеспечить широкое внедрение чистых технологий при использовании угля.

Все это вместе взятое приводит отечественных экспертов к мысли о возможных изменениях мировых топливных потоков и всей структуры международной торговли энергоресурсами. Возможно, развернутся потоки природного газа в сторону промышленных районов Урала, Сибири, Дальнего Востока. Ужесточение конкуренции на рынке энергетических углей позволит поставлять на российские ТЭС угли значительно лучшего качества. Такая ситуация не учитывалась в прогнозах и планах развития энергетики России на период до 2020 и 2030 гг.

### **3.7. Использование мазута как энергетического топлива**

---

В ходе совершенствования технологии сжигания мазута на ТЭС был выполнен огромный объем работ по ограничению сернистой и серноокислотной коррозии поверхностей нагрева, очистке поверхностей нагрева от сажистых и иных отложений, распылу мазута в мазутных горелках, подогреву мазута. На этом фоне, по мере освоения нефтяниками эффективной глубокой переработки нефти с увеличенным выходом светлых продуктов до 80 % и более (против 60 % в прежней устаревшей технологии), сокращалось производство мазута, он стал к тому же важным экспортным продуктом. Вопреки прогнозам экономистов, планировавших строительство мощных мазутных ТЭС, а также создание установок по газификации мазута непосредственно на электростанциях (Дзержинская ТЭЦ), мазут стал дефицитным топливом. В результате мазут за последние десятилетия решительно вытесняется из топливного баланса ТЭС. Это связано с его высокой стоимостью, сокращением поставок мазута на внутреннее потребление в связи с высокой ценой его на мировом рынке.

В настоящее время мазут используется в качестве растопочного топлива и служит в качестве резервного, аварийного топлива (табл. 3.1).

Суммарный расход мазута по ТЭС России составлял в последние годы около 5,0 млн т. В ряде случаев рассматривается возможность использования в качестве растопочного топлива вместо мазута угольной пыли микропомола, сжиженного газа.

Таблица 3.1

**Расход мазута на растопку котлов различной производительности**

Производительность котла по пару, т/ч	Расход мазута на одну растопку, т
50–75	3–6
120–160	10–25
220–420	30–80
640–670	80–100
1650	150–250
2650	250–350

### **3.8. Характеристика нефтекокса как энергетического топлива**

Совершенствование нефтехимического производства связано не только с ограничением производства мазута, но также с поступлением на топливный рынок нового вида твердого энергетического топлива — нефтяного кокса, побочного продукта глубокой переработки нефти. Объем его производства в России незначителен — до 5,3 млн т/год. В США годовой выход нефтекокса превышает 54 млн т, который сжигается на угольных ТЭС совместно с твердым топливом. На нефтеперегонных заводах он также подвергается газификации с получением газового топлива для собственных нужд и высокоценных химических товарных продуктов [8; 9]. Значительный объем производства нефтяного кокса и его прогнозируемый рост в России позволяют рассматривать этот продукт как потенциальный компонент топливного баланса энергетики.

Нефтяной кокс сочетает в себе особенности таких несхожих топлив, как мазут, тощие угли, угольный кокс и полукокс [10]:

1) агрегатное состояние и химический состав (горючая масса представлена в основном углеродом) приближают нефтяной кокс к углям по условиям подготовки и организации сжигания, хранения в насыпных штабелях на открытых складах, дробления и размола до пылевидного состояния, ввода в топки, в виде аэросмеси;

2) в отличие от натурального твердого топлива нефтяной кокс, имея сравнительно малый выход летучих (по которому обычно оценивается реакционная способность углей), характеризуется пористой структурой (подобно термообработанным углям), что не позволяет однозначно приравнивать его к низкореакционным углям, интенсивность воспламенения и выгорания которых напрямую связана с выходом летучих;

3) подобно мазутам, отличается низкой зольностью, несопоставимой с содержанием минеральных примесей в ископаемых углях;

4) за счет содержания в нефтяном коксе остаточных маслянистых веществ он обладает гидрофобными свойствами, что определяет несклонность к смерзанию и пылению при транспортировке и открытом хранении, слеживаемости, обладает высокой сыпучестью, что уменьшает вероятность (характерного для углей) зависания в бункерах сырого топлива, в пылевых бункера, забивания течек сырого угля и пыли;

5) имеет удельную теплоту сгорания существенно выше всех известных натуральных твердых топлив, что снижает массу транспортируемого и перерабатываемого на ТЭС материала, повышает температуру факела в топке.

По ряду топливных характеристик нефтяной кокс является аналогом мазута (что определяется их генетическим единством) — сернистость, зольность, содержание твердых металлов, которые (как и для мазута) зависят от исходной нефти. Это создает опасность проявления на пылеугольных котлах проблем, характерных для мазутных котлов: высокотемпературной коррозии (сероводородной, ванадиевой), низкотемпературной сернокислотной коррозии в конвективной шахте котла, высокой токсичности золы, являющейся по существу концентратом ванадия и других тяжелых металлов, увеличенного выброса в атмосферу сернистого ангидрида.

## 3.9. Локальные энергетические ресурсы ТЭС

### 3.9.1. О значимости торфа как топлива для энергетики

В настоящее время торф уже не рассматривается как базовое топливо для крупных котлоагрегатов. В то же время при развитии распределенной энергетики актуализировались проблемы использования торфа в качестве топлива в малых котлах.

Применительно к торфу — уникальному, практически невозобновляемому природному ресурсу — вопрос об использовании следует рассматривать как комплексную проблему, что обеспечит рациональное его использование. Лишь частично торф может использоваться как энергетическое топливо (по остаточному принципу). Можно выделить и ранжировать следующие основные сферы его использования:

- **торф как исключительно эффективный природный агроулучшитель**, способствующий восстановлению плодородия истощенных пахотных земель в силу своих уникальных физико-химических свойств, высокой водо- и газопоглотительной способности, высокой пористости, ионообменным качествам, биологической стерильности. Это особенно важно для России при нынешнем состоянии агрохозяйства, снижении качества почвенного слоя вследствие неэффективного и расточительного использования этого природного ресурса. Вытеснение химических удобрений для производства экологически чистых продовольственных продуктов приводит к резкому возрастанию значимости торфа как средства стабилизации природных ресурсов агропроизводства. В настоящее время до 70 % добываемого в мире торфа направляется на сельскохозяйственное использование;

- **торфяные болота как важный экологический фактор**, обеспечивающий регулирование и стабилизацию гидрологического режима прилегающих территорий, выполняющий функции природного аккумулятора и перераспределителя загрязнений, естественного биогеохимического барьера на пути загрязненных стоков, поддерживая чистоту водоисточников; болота являются местом обитания редких и промысловых животных, естественными плантациями лекарственных трав и ягодников Свердловской области, особенно северной ее части. Болота, поглощая диоксид азота из атмосферы, способствуют сокращению в ней концентрации «тепличных» газов. Таким образом, болота являются важным стабилизирующим фактором окружающей природ-

ной среды. Интенсивное разрушение болотных систем на Урале привело к сокращению числа экологически ценных торфоболот на 30 %, а вблизи городов — на 90 %;

— **торф как важнейшее сырье для получения ряда высокоценных продуктов** — твердое вещество торфа состоит из высокомолекулярных соединений, которые могут служить для получения кормовых продуктов (что приобретает особую значимость в условиях повышения цен на продовольствие на мировых рынках и необходимость резкого наращивания сельхозпроизводства в России), медицинских препаратов. Таким образом, торф надо рассматривать как незаменимое природное сырье для получения искусственным путем биологических продуктов — кормов для животноводства, препаратов для медицины;

— **торф как значимое топливо для коммунальных целей** — печное отопление квартир, индивидуальных домов и использование торфяных брикетов. Такое использование торфа широко практиковалось до 60-х гг. в Екатеринбурге, до газификации города. Торф в этих условиях значительно эффективнее древесины — компактность, простота и меньшая трудоемкость использования, большая теплота сгорания. И в настоящее время для жилых объектов вне зоны централизованного тепло- и газоснабжения, в сельской местности, зоне коттеджной застройки целесообразно возрождение этой сферы использования торфа.

Названные сферы использования торфа являются приоритетными по отношению к энергетическому его использованию, доля которого формируется по остаточному принципу. Оставшаяся часть ресурса торфяных болот, которые могут разрабатываться с учетом экологических ограничений, составляет потенциальный топливный ресурс для энергетики. Однако из этого остатка следует изъять торфяные залежи, практически недоступные для использования в энергетике — в силу отдаленности от потребителей, транспортных систем. Сложившийся таким образом остаточный ресурс торфа как энергетического топлива не может быть реализован на крупных энергопредприятиях, поскольку по экономическим и климатическим соображениям ограничена протяженность путей его транспортировки от торфяных полей к ТЭС (не более 200 км, по оценке специалистов). Практически невозможно в ареале такого радиуса организовать обеспечение торфом электростанции установленной мощностью свыше 50–70 МВт.

Следует также подчеркнуть специфику экологических свойств торфа как топлива. Вопреки распространенному мнению, торф не явля-

ется ни возобновляемым (срок восстановления выработанных торфяных болот — до 300 лет), ни экологически чистым топливом. Удельный выход «тепличного» газа  $\text{CO}_2$  на тонну условного топлива составляет:

- для жидкого топлива (бензин, дизельное топливо, мазут) — 2,01–2,27 т;
- для угля (в среднем) — 2,76 т;
- для торфа — 3,09 т — больше, чем для всех используемых в энергетике топлив.

При сжигании торфа отмечается повышенная эмиссия закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$  — одного из наиболее опасных парниковых газов — 0,004 кг/ГДж, для угля этот показатель составляет не более 0,0014 кг/ГДж.

Таким образом, не следует рассматривать торф как топливо для значительных генерирующих объектов. Сфера его рационального применения для выработки электроэнергии ограничивается мини-ТЭС единичной мощностью от 1 до 25 МВт для обеспечения локальных потребителей электрической и тепловой энергией (что позволяет при комбинированном производстве обоих видов энергии получить высокую экономичность энергопроизводства).

### 3.9.2. Использование на ТЭС попутного нефтяного газа

Одной из актуальных экономических и экологических проблем топливно-энергетического комплекса является утилизация попутного нефтяного газа (ПНГ).

Попутные нефтяные газы ПНГ представляют смесь углеводородных газов, находящихся в нефтяных залежах в растворенном состоянии и выделяющихся из нефти при снижении давления. Количество кубометров газа, приходящееся на 1 т добытой нефти, зависит от условий формирования и залегания нефтяных месторождений и может составлять от 1–2 до нескольких тыс.  $\text{м}^3$ . Основными составляющими ПНГ являются предельные углеводороды — гомологи метана от  $\text{CH}_4$  до  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ . Суммарное содержание гексана ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ) и более тяжелых углеводородов в попутном газе, как правило, не превышает 1 %, содержание пентана ( $\text{C}_5\text{H}_{10}$ ) находится в пределах 2 %. Кроме того, в ПНГ присутствуют инертные газы, в основном азот и углекислый газ, содержание которых изменяется от 1 до 5 %.

На некоторых ТЭС (например, Нижневартовская ГРЭС), находящихся в зоне разработки нефтяных месторождений, в качестве основного топлива служит попутный нефтяной газ. Ежегодно в России

извлекается порядка 55 млрд м<sup>3</sup> попутного нефтяного газа, и только 25–30 млрд м<sup>3</sup> из них используется в промышленности, оставшиеся сжигаются на факельных установках, что составляет почти 12 % всех выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в России.

Сжигание ПНГ в открытых факелах осложняет экологическую обстановку в районах промыслов, создавая повышенные локальные приземные концентрации вредных веществ. Сжигание ПНГ в открытых факелах способствует усилению парникового эффекта за счет теплового излучения, выделения в атмосферу несгоревшего топлива — метана, являющегося «тепличным» газом в большей мере, чем СО<sub>2</sub>. Поэтому необходимость ограничения сжигания ПНГ на факелах признана глобальной проблемой защиты климата планеты и рационального использования природных ресурсов. В настоящее время проводится активная работа по координации деятельности государств в этой сфере. Рядом стран приняты соответствующие национальные законодательные акты. Так, в США законом запрещено сжигание на факелах более 3 % ПНГ.

Сегодня цена попутного нефтяного газа примерно соизмерима со стоимостью природного, так как требуются затраты на его переработку. ТЭС принимают отбензиненный, так называемый осушенный газ.

Наибольшее распространение среди способов утилизации ПНГ в мировой практике нашла закачка его в пласт. В России помимо закачки в пласт используются еще три основных направления утилизации ПНГ: подача в газотранспортную систему (ГТС) ПАО «Газпром», использование в качестве топливного газа и транспортировка к месту переработки. Задача ограничения сжигания ПНГ в факелах рассматривается не только как экологическая, но и как эколого-экономическая, учитывая высокие качества этого газа как сырья для получения ценных химических продуктов и энергетического топлива, цена его на мировых рынках составляет в среднем 30 долларов США за 1000 м<sup>3</sup>.

### **3.9.3. Использование в качестве энергетического топлива шахтного метана**

Шахтный метан — газ, содержащийся в угольных пластах и окружающих породах. Он является природным газом по происхождению и побочным продуктом разработки углегазовых месторождений. Шахтный метан извлекается на поверхность вакуумнасосными станциями



через специально пробуренные скважины, при этом он смешивается с воздухом, проникающим в шахту. Во всех случаях использование получаемой в качестве энергетического топлива метановоздушной смеси определяется ее составом, т. е. соотношением в ней метана как такового и воздуха. Шахтный метан — обедненные метановоздушные смеси с колебаниями дебета и концентрации метана — поступает в атмосферу, являясь «тепличным» газом (угроза парникового эффекта):

- с аспирационными системами главного проветривания шахт  $C_{CH_4} \approx$  до 0,7 %;
- каптированный выброс дегазационными системами (на глубину до 2,5 км),  $C_{CH_4}$  до 25 %.

Использование шахтного метана в качестве топлива для производства тепловой и электрической энергии повышает рентабельность и снижает взрывоопасность угольных разработок, сокращает выбросы вредных веществ в атмосферу, улучшая экологическую обстановку. В США утилизируется ежегодно 35 млрд  $m^3$  шахтного метана. Реальными являются следующие технологии использования метана-воздушных слоев из шахт — совмещенное сжигание с энергетическим топливом — уголь, газ.

В Кузбассе планируется начать промышленную добычу метана из угольных пластов. Для осуществления этого проекта в Ерунаковском геолого-экономическом районе пробурено четыре опытно-промышленные скважины. Его запасы в угольных пластах Кузбасса составляют более 13 трлн  $m^3$ . Всего же в освоенных угледобычей регионах России на глубине до 1800 м содержится не менее 15 трлн  $m^3$  метана, а прогнозные ресурсы метана угольных месторождений оцениваются, по различным источникам, в пределах 50—80 трлн  $m^3$ , что близко к запасам традиционных газовых месторождений страны (по данным Министерства энергетики Российской Федерации). Отмечается поступление с шахтным метаном также водорода из глубинных пластов, рассматриваемое как продукт дегазации магмы. По мере освоения глубоких горизонтов эти процессы могут усиливаться.

Средствами дегазации извлекается на российских шахтах 1747  $m^3$ /мин метановоздушной смеси при средней объемной доле метана в ней 27 %. При обработке метанообменных угольных пластов на глубину до 600 м планируется извлечение метана до 2000—3000  $m^3$ /мин. Извлечение метана средствами дегазации пластов осуществляется методом вакуумирования скважин, пробуренных с поверхности земли либо из горных

выработок [11]. Полагается, что присутствие водорода в значительной мере определяет взрываемость шахтного метана. Крупнейшим проектом использования шахтного метана является австралийская ТЭС с 94 двигателями внутреннего сгорания Caterpillar мощностью по 1 МВт. Такая единичная мощность выбрана для возможности эксплуатации максимального числа ДВС, работающих с полной нагрузкой и, следовательно, с максимальным КПД. Следует отметить, что на Китай, Россию, Польшу и США приходится более 70 % мировых выбросов шахтного метана в атмосферу.

#### **3.9.4. Угольный полукокс как энергетическое топливо**

В процессе полукоксования (пиролиза) угля при нагреве без доступа кислорода до 850 °С происходит термохимическая обработка, связанная с выделением горючего пиролизного газа, жидких продуктов и коксового остатка — полукокса. Полученный полукокс может использоваться как топливо, высокоэффективный сорбент. Полукокс отличается умеренной теплотой сгорания, малым выходом летучих до 3–7 %.

Открытое длительное хранение полукокса в штабеле приводит к насыщению его кислородом, влагой и значительной утрате удельной теплоты сгорания. Данные, полученные при подготовке пробного сжигания полукокса ирша-бородинского угля, позволяли рассматривать полукокс исходного состава как высококалорийное, высокореакционное топливо с умеренной влажностью (10–14 %). Однако анализами проб топлива непосредственно перед проведением испытаний после нескольких месяцев хранения полукокса в открытом штабеле установлено изменение элементного состава полукокса с момента его получения до подачи в топку: увеличилось содержание кислорода в горючей массе, снизилось содержание углерода с 93 до 89 %. За время хранения в открытом штабеле влажность полукокса увеличилась до 19–23 %, теплотворная способность, отнесенная к сухой массе, уменьшилась с 27,7 МДж/кг до 23,9 МДж/кг. Одновременно возросла зольность на рабочую массу до 24 %, относительное изменение зольности составило 23 %. Таким образом, показаны специфические условия открытого хранения полукокса, связанные с высокой сорбционной емкостью (по отношению к влаге) и высокой реакционной способностью (склонность к окислению в штабеле).

Поэтому оптимальной является термообработка угольной пыли с получением полукокса непосредственно перед подачей его в топку (встроенные системы подогрева).

### 3.9.5. Биотопливо в энергетике

Условно к возобновляемым источникам энергии можно отнести также сжигаемые растительные продукты — биотопливо (древесина, тростник, солома), которое может использоваться для производства электроэнергии, тепла и газообразного топлива. Биотопливо отличается высоким выходом летучих компонентов, малым содержанием серы. Сравнительно низкая стоимость этого местного топлива, малые удельные выбросы загрязнителей делают его конкурентоспособным с ископаемыми топливами на ТЭС малой мощности и в котельных.

Древесина, по Киотскому протоколу, по отношению к парниковому эффекту считается «CO<sub>2</sub>-нейтральным» видом топлива, и выбросы от нее приравниваются к нулю. Поэтому спрос на нее будет расти, пока идет борьба за сохранение климата, производство «зеленой» энергии, получаемой на основе сжигания биотоплива. В ряде стран для получения достаточного по объему и стабильности ресурса «зеленого» топлива проводится выращивание растительности — лесонасаждения быстрорастущих древесных пород, создание особым образом заложенных посадок деревьев с укороченным оборотом рубки (энергетических плантаций). В конце XX в. промышленные энергетические лесные плантации в мире занимали площадь более 12 млн га. Они отводились для посадки быстрорастущих пород ивы, тополя, ольхи и др. с улучшенными генетическими характеристиками. Ежегодный прирост на таких плантациях составляет 7–12 м<sup>3</sup>/га, а при использовании генетически улучшенных растений — намного больше [11].

Масштабы использования сжигания биомассы весьма значительны, к примеру, с помощью таких установок покрывается около 1 % общего потребления в Германии, общий же их потенциал в стране оценивается около 220 ТВт·ч/год (в 2006 г. потребление электроэнергии составило 630 ТВт·ч/год). В странах ЕС 20 % производимой всеми возобновляемыми энергии получается за счет сжигания биомассы. В Германии планировалось к 2015 г. ввести 1 миллион котельных, которые работали бы на топливных гранулах, правительство анонсировало грант в размере 1500–2000 евро, который выдается каждому домовладельцу, устанавливающему котел на топливных гранулах. За рубежом ли-

дерами энергетического использования древесины являются Финляндия (23 % энергетического баланса) и Швеция, где доля биотоплива в энергетическом балансе страны составляет 18 %, при этом 7 % тепловой энергии вырабатывается теплостанциями на древесных отходах. Мощность станций достигает 375 МВт. Имеются сотни котельных, работающих на щепе. Город Эксельсунд с населением в 200 тыс. человек снабжается теплом и электроэнергией, вырабатываемыми только на щепе. В Дании эксплуатируется более 700 тысяч котлоагрегатов на дровах, древесных щепе и гранулах мощностью до 365 МВт. Эту работу стимулируют цены на сырье для энергетики.

### **3.9.6. Возможности использования в энергетике твердых бытовых отходов и биогаза**

Эта проблема широко обсуждается в научной отечественной литературе [12; 13] при незначительной практической реализации таких технологий.

#### *Биогаз мусорных свалок*

Биогаз мусорных свалок (50 %  $\text{CH}_4$ , 30 %  $\text{CO}$ , 10 %  $\text{H}_2$ ) является крупнейшим антропогенным источником выбросов метана, также летучих органических соединений, причастных к образованию смогов. Но он также является эффективным энергетическим топливом. С 1996 г. эксплуатируется ТЭС Hanes Mill с газовой турбиной мощностью 4,3 МВт, обычно целиком работающая на биогазе. В США общая мощность энергоустановок на мусорных свалках составляет около 300 МВт. Реализация выработанной на биогазе электроэнергии связана в США со значительными налоговыми льготами. Использование биогаза в качестве топлива предполагает местный режим потребления, когда не требуется перекачка газа на большие расстояния. Освоение этого топлива — важная экологическая задача российских энергетиков.

#### *Твердые бытовые отходы (ТБО)*

ТБО являются доступным и экономически целесообразным возобновляемым источником энергии. В настоящее время только в Европе за счет термической утилизации отходов вырабатывается более 28 млрд кВт·ч электроэнергии и примерно 70 млрд кВт·ч тепловой энергии. В США суммарная электрическая мощность установок, сжигающих ТБО, составляет 2700 МВт. При этом следует отметить, что помимо энергообеспечения путем термической переработки отходов решается важная социальная проблема — очистка крупных городов от ТБО. От-

ходы, используемые в качестве топлива, характеризуются показателями, приведенными в табл. 3.2

Таблица 3.2

**Показатели отходов, используемых в качестве топлива**

Вид отходов	$Q_i^r$ , кДж/м <sup>3</sup>	$W^r$ , %	$A^r$ , %
Неподготовленный мусор (бытовые твердые отходы)	5250–9220	20–45	18–45
Подготовленный бытовой мусор	10000–12000	29,1	21,1
Осадок сточных вод	4200–8400	50	13,0

Низшая теплота сгорания в пересчете на рабочую массу отходов г. Москвы составляет в среднем 7500–8000 кДж/кг, влажность около 30–40 %, зольность — 25–30 %. С учетом изменения морфологического состава (увеличения доли упаковочных материалов, пластика, бумаги, уменьшения пищевых отходов) наблюдается тенденция повышения теплоты сгорания ТБО (в странах Западной Европы она достигает 10500–12500 кДж/кг). Ежегодно в России образуется около 40 млн т бытовых отходов, однако из них как топливо используется менее 1,0 %, что ничтожно мало по сравнению со Швейцарией (80 %), Данией (80 %), Японией (85 %), Францией (65 %), Германией (60 %). Сжигание бытовых и промышленных отходов, а также биомассы следует считать приоритетным возобновляемым источником энергии. В то же время термическое обезвреживание решает острейшую проблему крупных городов, связанную с утилизацией этих отходов.

Годовое количество теплоты, которое можно получить из мусора, образуемого в городе с населением в 1 млн человек, эквивалентно ~40 тыс. т жидкого топлива. В целом использование пригодного для сжигания бытового мусора может покрывать до 7 % всех энергетических потребностей страны (данные Института химфизики РАН).

### **3.10. Использование потенциальной физической энергии топливного газа перед сжиганием**

Энергетическое газообразное топливо, поступающее на ТЭС, обладает не только потенциальной химически связанной энергией, выделяемой при сжигании газа, но также потенциальной физической

энергией — энергией сжатого газа, которая может быть преобразована в механическую энергию вращения ротора турбины при расширении в проточной части. Это положение относится к природному газу, а также к технологическим газам (в частности, доменному газу). Использование этих газов для выработки электроэнергии может осуществляться в два этапа:

- утилизация избыточного давления топливного газа, для чего используются расширительные бескомпрессорные газотурбинные установки (турбодетандеры);
- сжигание в топке энергетического котла газа после его дросселирования в проточной части расширительной турбины.

Доля энергии, вырабатываемой за счет избыточного давления топливного газа, сравнительно невелика — не более 2 % от энергии, вырабатываемой за счет сжигания газа. Однако в абсолютном выражении количество утилизируемой энергии значительно, она может покрывать большую часть собственных нужд ТЭС.

### *1) Утилизация избыточного давления природного газа на ТЭС*

Транспортировка природного газа по магистральным газопроводам от места добычи осуществляется под давлением 7,5–5,6 МПа. В разводящих трубах в пределах жилых массивов давление газа не превышает 1,2 МПа. В то же время давление газа у газосжигающих устройств (в том числе и горелок энергетических котлов) составляет 0,2–0,4 МПа и менее. Избыточная потенциальная энергия газа, которая теряется в дроссельных устройствах расширительных станций ГРС и газорегулирующих пунктов ГРП, может быть использована для выработки дополнительной электроэнергии, частично возмещающей затраты энергии на сжатие газа на входе в магистральные трубопроводы и по трассе для поддержания расчетного давления. Так, при расходе природного газа, используемого блоком 800 МВт, с перепадом давлений 1,1–0,17 МПа может быть получена дополнительная мощность 11 МВт. Мировая энергетика уже более 20 лет использует энергию сжатого природного газа с помощью 300 расширительных утилизационных газовых турбин — турбодетандеров единичной мощности 300–500 кВт. В России в эксплуатации находятся агрегаты Уральского турбинного завода мощностью 11 МВт (Среднеуральская ГРЭС), два таких агрегата единичной мощностью 5 МВт производства «Криокор» (ТЭЦ-21 АО «Мосэнерго»).

Турбина ТГУ-11 представляет собой многоступенчатый турбодетандер, использующий для выработки электроэнергии избыточное дав-



ление природного газа, поступающего в качестве топлива в котел тепловой электростанции (рис. 3.3). Турбина встраивается параллельно дроссельным клапанам расширительной станции на линии газоснабжения ТЭС. Температура газа при расширении в турбодетандере значительно снижается до отрицательных температур, поэтому газ предварительно подогревают для получения приемлемой температуры его перед котлом.

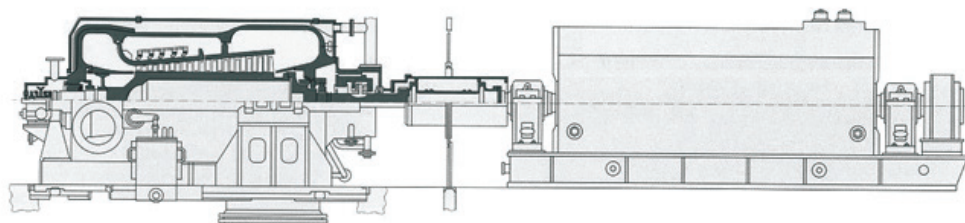


Рис. 3.3. Продольный разрез турбины ТГУ-11

Основные технические параметры ТГУ на номинальном режиме:

- мощность на муфте генератора — 11,5 МВт;
- давление газа перед стопорным клапаном — 11,0 кгс/см<sup>2</sup>;
- давление газа за турбиной — 1,7 кгс/см<sup>2</sup> (абс.);
- температура газа перед турбиной — 135 °С;
- расход газа — 42,5 кг/с;
- частота вращения ротора — 3000 об./мин;
- КПД с учетом потерь на клапанах — 87 %.

## 2) Утилизация избыточного давления технологических газов

Газовая бескомпрессорная утилизационная турбина типа ГУБТ (рис. 3.4), серийно выпускаемая Уральским турбинным заводом, предназначена для выработки электрической энергии за счет утилизации избыточного давления доменного газа на металлургических заводах. Турбина позволяет возратить до 40 % энергии, затраченной на доменное дутье. Развиваемая турбиной мощность зависит от режима работы доменной печи, определяется давлением и расходом доменного газа. В зависимости от этого мощность ГУБТ может составлять от 6 до 12 МВт (табл. 3.3). Турбина поставляется с газоподогревателем либо без него. В конструкции турбины предусмотрен поворотный направляющий аппарат, позволяющий настраивать турбину на изменяющиеся условия работы доменной печи. Конструкция корпуса турбины исключает протечки токсичных газов в зону обслуживания в помещении машзала.



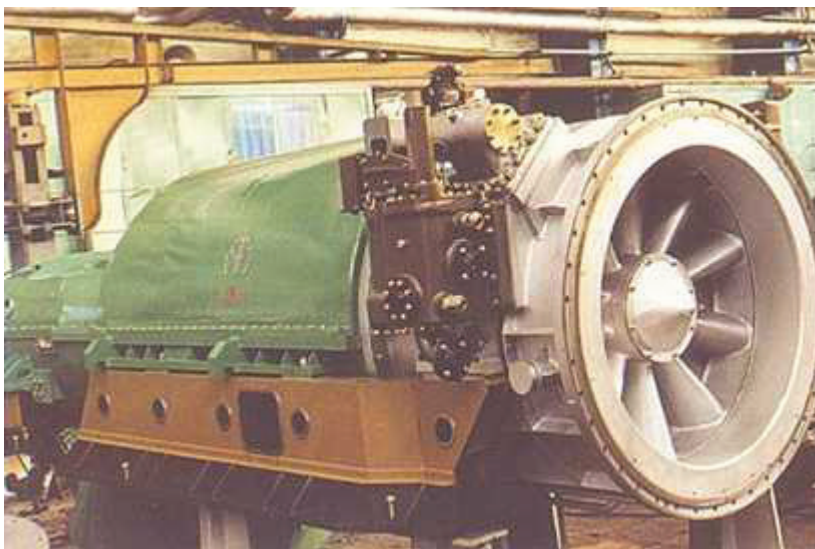


Рис. 3.4. Общий вид газовой бескомпрессорной утилизационной турбины типа ГУБТ

Таблица 3.3

**Основные технические параметры ГУБТ-12 М**

Показатель	С подогревом	Без подогрева
Мощность на муфте вала турбины, МВт	12	10
Внутренний относительный КПД, %	85	84
Расход доменного газа, нм <sup>3</sup> /ч	3600	4100
Давление газа перед турбиной (абс.), МПа	0,32	0,32
Температура газа перед турбиной, °С	140	40
Давление газа за турбиной (абс.), МПа	0,11	0,11

## Литература к разделу 3

---

1. Конторович А. Э. Роль и место угля в топливно-энергетическом балансе мира в XXI в. // Материалы Всемирного горного конгресса. Кемерово, 2011.
2. Краснянский Г. А. Материалы обсуждения вопросов о роли угля в мировой экономике экспертами Международного энергетиче-

- ского совета (ноябрь 2012 г., Париж) // Российская газета. Федеральный выпуск. № 5883 (17).
3. Мастепанов А. М. Минерально-сырьевая и ресурсная база ТЭК России // Энергия : Экономика, Техника, Экология. 2010. № 8.
  4. Белосельский Б. С., Барышев В. И. Низкосортные энергетические топлива. М. : Энергоатомиздат, 1989.
  5. Алехнович А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск : Цицеро, 2012.
  6. Схема территориального планирования в области энергетики на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 01.08.2016 № 1634-р).
  7. Кожуховский И. С. Перспективы развития угольной энергетики России // Энергетик. 2013. № 1.
  8. Глаголева О. Ф. Непрерывное коксование в схемах современных НПЗ // Мир нефтепродуктов. 2008. № 5.
  9. Валявин Г. Г., Хухрин Е. А., Валявин К. Г. Место процесса замедленного коксования в схемах современных нефтеперерабатывающих заводов // Химия и технология топлива и масел. 2007. № 3.
  10. Шульман В. Л., Паршуков В. С. Энергетическое использование нефтекокса // Горение твердого топлива : сб. трудов VI Всероссийской конференции (8–10 ноября 2006 г.). Новосибирск, 2006. Ч. 3. С. 121–125.
  11. Использование отходов в целях получения энергии. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL : <http://www.namusoril.ru/> (дата обращения : 28.04.2016).
  12. Демина Л. А. Теплоэлектростанции на твердых бытовых отходах (европейский опыт) // Энергия : экономика, техника, экология. 2009.
  13. Использование древесной биомассы в энергетических целях : научный обзор. Минск : Издательство МГЭУ им А. Д. Сахарова, 2008.

---

## **4. КАЧЕСТВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ И ЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ**

---

### **4.1. Качество углей, используемых в отечественной энергетике**

---

Актуальным направлением совершенствования технологии сжигания топлива является повышение качества топлива, поступающего на ТЭС, и подготовка топлива к сжиганию непосредственно в производственном цикле ТЭС. Это касается всех видов топлива — угля, мазута, газа.

Общей проблемой на протяжении всего пути развития российской энергетики оставалось использование таких низкокачественных углей, которые не имеют аналогов в зарубежной практике. Уголь, используемый в настоящее время в отечественной энергетике, характеризуется следующими показателями:

- зольность — от 8,7 до 51,7 %;
- влажность — от 8,1 до 50,5 %;
- теплота сгорания — от 7900 до 25100 кДж/кг.

Соответственно этому выделяются низкокачественные угли, сжигание которых связано с затруднениями различного характера (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Основные проблемы сжигания низкокачественных углей**

№	Тип низкокачественного угля	Возникающие при сжигании проблемы
1	Низкорекреакционные	Трудновоспламеняемость вследствие низкого выхода летучих (от 3 до 12 %)
2	Высокозольные	Шлакование, золовой износ, повышенная нагрузка золоуловителей и золошлакоотвалов
3	Высоковлажные	Снижение КПД котла, необходимость подсушки топлива, необходимость организации сброса сушильного агента помимо горелки
4	Низкокалорийные	Низкая полнота сгорания топлива, необходимость повышения температуры в топке, необходимость подсветки факела высококалорийным топливом

Более четверти общего объема потребляемого угля имеет зольность свыше 40 %, а теплоту сгорания — ниже 12500 кДж/кг. Калорийный коэффициент угля в России составляет всего 0,64 (18710 кДж/кг), для сравнения: в Китае — 0,67, в Великобритании и в Австралии — до 0,87, в Польше — 0,85, в Германии — 0,83–1,06, в США — 0,76–1,07, а в Японии (вовсе не обладающей топливными ресурсами) — 0,86–1,21. В СССР средняя зольность угля приближалась к 28 %, а в развитых странах, где 70–80 % добываемого энергетического угля обогащается, при производстве электроэнергии используется уголь, зольность которого не превышает 10 %.

Стандарты качества энергетического топлива в нашей стране за весь период развития энергетики не существовали, поэтому законодательно не нормировались технологические и экологические показатели топлив. За рубежом устанавливали в различный период жесткие нормативы качества топлива для энергетики, в нашей стране ставилась обратная задача — приспособливать действующее и вновь создаваемое энергооборудование к поставляемому топливу (в соответствии со структурой топливного баланса, определяемой Госпланом страны).

Отечественная энергетика, используя такое низкокачественное энергетическое топливо (высокозольное, высокосернистое, низ-

кокалорийное), не применяемое за рубежом, смогла решить вопросы устойчивости горения, надежности и экономичности оборудования.

## **4.2. Технологические и экологические характеристики энергетического топлива**

---

Свойства топлива оказывают влияние практически на все компоненты деятельности ТЭС. Поэтому полная оценка технологических и экологических свойств играет большую роль при формировании структуры топливопотребления энергопредприятий, энергетики отдельных регионов и отрасли в целом, а также при разработке технологии энергетического использования для конкретных объектов.

### **4.2.1. Оценка технологических качеств угля**

Качество топлива не определяется неким универсальным показателем, оно оценивается исходя из конечной цели и конкретных условий его использования. Для этого служит обширный набор характеристик топлива, который значительно шире основных сертификационных показателей — теплота сгорания, зольность, влажность, выход летучих, содержание серы и азота, химический состав золы, температура плавления золы, коэффициент размолоспособности, гранулометрический состав. Например, реакционные свойства угля не могут характеризоваться однозначно, поскольку их проявление на ТЭС многообразно [1; 2]:

- воспламенение в топке;
- выгорание коксового остатка;
- склонность к окислению и самовозгоранию при хранении в штабеле;
- взрываемость угольной пыли.

Для угля можно выделить следующие характеристики [3]:

1) по условиям формирования факела, зоны горения в слое: удельная теплота сгорания, выход летучих, температура воспламенения, реакционная способность, температура горения;

2) по условиям транспортировки и хранения топлива: пыление, самовозгорание в штабеле, влажность;

3) по условиям подготовки угля к сжиганию: размолоспособность, сыпучесть пыли, влажность, взрываемость пыли;

4) по стабильности топочного процесса: плавкостные характеристики минеральной массы угля; склонность к образованию натрубных отложений;

5) по надежности поверхностей нагрева в топочной камере и в конвективной шахте: абразивность золы, содержание серы и золы в исходном угле;

6) по экологическим показателям: содержание в исходном топливе золы, азотсодержащих соединений, соединений серы, тяжелых металлов, оксидов кальция, кремния, ртути;

7) экономичность топочного процесса: удельная теплота сгорания, влажность, зольность.

Влияние характеристик угля на режим работы и технико-экономические показатели котла представлено в табл. 4.2.

Таблица 4.2

## Влияние характеристик топлива на работу оборудования ТЭС

Характеристика	Влияние на режим работы котла	Воздействие на технико-экономические показатели
Теплота сгорания	<i>При снижении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• повышается минимальная производительность котла по условиям устойчивости горения;</li> <li>• снижается температура в топке и газоходах котла;</li> <li>• требуется подсветка факела мазутом</li> </ul>	<i>При снижении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• рост удельного расхода топлива на выработку энергии, на собственные нужды;</li> <li>• сужается диапазон рабочих нагрузок</li> </ul>
	<i>При повышении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• возрастает температура топочных газов;</li> <li>• опасность шлакования</li> </ul>	<i>При повышении:</i> возможно повышение экономичности
Зольность угля	<i>При повышении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• возрастает износ оборудования;</li> <li>• снижается эффективность золоуловителей</li> </ul>	<i>При повышении:</i> каждый процент роста золы в угле снижает КПД на 0,1–0,15 %, увеличивает расход электроэнергии на собственные нужды на 0,13 %

Окончание табл. 4.2

Характеристика	Влияние на режим работы котла	Воздействие на технико-экономические показатели
Влажность угля	<i>При уменьшении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• рост температуры пыли за мельницами;</li> <li>• опасность взрыва</li> </ul>	<i>При уменьшении:</i> —
	<i>При увеличении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• рост влажности готовой пыли, что ухудшает условия воспламенения, выгорания;</li> <li>• ухудшение сыпучести пыли, ухудшение условий транспортировки по тракту — зависание в бункерах, пылепроводах;</li> <li>• увеличение смерзаемости угля, что потребует большего расхода тепла на размораживание;</li> <li>• рост объема и скорости дымовых газов по тракту, что усиливает абразивный износ</li> </ul>	<i>При увеличении:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ограничивает производительность дымососов и производительность котла;</li> <li>• возрастает расход электроэнергии на собственные нужды</li> </ul>

В этой совокупности показателей охвачены все аспекты технологической линии энергопроизводства — от разгрузки, подготовки топлива до ограничения выбросов загрязнителей в атмосферу, организации складирования золошлаковых отходов. Они позволяют прогнозировать соответствующие технико-экономические и экологические показатели ТЭС или направленно организовать подготовку топлива, топочный процесс с тем, чтобы обеспечить заданные показатели оборудования. Ранжировать отдельные характеристики можно по вкладу каждой из них в капитальные и эксплуатационные затраты энергопредприятия, на прогнозируемую себестоимость производимой энергии, на обеспечение экологической безопасности ТЭС. Может оказаться, что негативное влияние отдельных характеристик топлива будет столь значительным, что использование его на данном объекте будет неприемлемым. Один и тот же показатель может оцениваться совершенно различным способом в зависимости от принятой технологии сжигания топлива: низкая температура плавления золы благоприятна для топки с жидким шлако-



удалением и опасна для низкотемпературного топочного режима с сухим шлакоудалением. В большинстве случаев проявление каждой отдельной характеристики топлива может быть неоднозначным.

Рассмотрим влияние некоторых качественных характеристик угля на топочный режим и соответствующее изменение технико-экономических показателей.

#### **4.2.2. Показатели экологических качеств исходного угля**

К настоящему времени угольная генерация в России производит до 20 % электроэнергии, при этом доля ее в суммарном выбросе загрязнителей от электростанций составляет 70 %. Топливо является наиболее существенным фактором формирования экологических показателей ТЭС.

Сложившееся ранжирование энергетических топлив по «экологической чистоте» (от экологически «чистого» природного газа до «наиболее загрязняющего» твердого топлива) исходит из оценки качества топлива, ограничивающейся учетом содержания:

- негорючей минеральной части,
- серы и связанного азота, являющихся источником появления кислотообразующих газообразных компонентов дымовых газов (оксидов серы, азота);
- твердых остатков (золы, микроэлементов).

На мировом рынке оценка потребительских качеств угля по экологичности производится, в основном, по трем основным показателям — удельная теплота сгорания, зольность и сернистость, а в последнее время — также выделение парниковых газов, ртути.

Однако исходные характеристики топлива не определяют конечный характер экологических последствий его применения. Они зависят не только от природных свойств ископаемого топлива, но также:

- от технологии его использования — подготовки и сжигания топлива, обработки, хранения и утилизации отходов, рассеивания выбросов, возможности утилизации загрязненных стоков;
- характера природной среды и экологической ситуации в зоне конкретной ТЭС.

Дилемма «чистые — грязные топлива» должна быть вытеснена проблемой адекватности технологии использования данного топлива его исходным, экологически значимым характеристикам и формированием на этой основе потребительской ценности топлива. Таким об-

разом, могут быть сформулированы необходимые требования к экологически совершенной технологии энергетического использования конкретного топлива с учетом экологической ситуации и природно-климатических особенностей в зоне размещения ТЭС. Существующие в ряде стран ограничения для использования топлив с большим содержанием потенциально опасных веществ, в частности нормативное ограничение на содержание серы в исходном угле, используемом в котлах различной мощности (Дания — 1,2 %, Германия, Италия — 1 %), не исключают использование угля с повышенным содержанием серы при условии оснащения котлов устройствами десульфуризации. Выбором технологии энергетического производства для отдельных топлив соответственно составу его минеральной и органической массы можно не только оптимизировать экологические показатели ТЭС на различных видах топлива, но и оказывать позитивное влияние на решение региональных экологических проблем, формирующихся вне ТЭС.

Для традиционных методов сжигания (без применения технологических методов ограничения газообразных вредных выбросов) экологическая опасность выбросов ТЭС (количество летальных исходов на ГВт<sub>эл</sub> в год) на экибастузском и кузнецком углях соответственно в 5 и 2 раза выше, чем для канско-ачинского угля. При переходе к сжиганию в кипящем слое или в установках с внутрицикловой газификацией экологическая опасность выбросов ТЭС для всех указанных углей практически выравнивается.

Ряд технологических схем позволяет трансформировать экологически неблагоприятные исходные свойства топлива в позитивные его качества. Так, оснащение ТЭС, сжигающих высокосернистые угли, мазут, установками десульфуризации с получением в качестве товарного продукта гипса и элементарной серы делает производство этих побочных продуктов экономичнее и экологичнее, чем на специализированных предприятиях. Использование сточных вод ТЭС (со значительным содержанием алюмосиликатов) для безреагентной очистки сточных вод других смежных предприятий (металлургии, нефтехимии) позволяет обеспечить в отдельных случаях улавливание по меди до 50 %, никелю — до 90 %, нефтепродуктам — до 80 %.

Экологическая значимость свойств исходного топлива существенно зависит от характера окружающей природной среды и может существенно изменить оценку «экологичности» топлива, устанавли-

ваемую по исходному его составу. Известно, что ТЭС, работающие на природном газе, оказывают на Севере страны подкисляющее воздействие на почвы. Характерным, хотя и парадоксальным на первый взгляд, является предложение, высказанное рядом специалистов, о целесообразности создания в юго-восточной части Тюменской области, на территории основного газодобывающего района страны, пылеугольной ТЭС на канско-ачинском угле. В этом случае экологические проблемы, связанные с крупномасштабным использованием природного газа, могут быть частично компенсированы с помощью пылеугольной станции. Такое решение позволит:

- использовать высококальцевые золошлаки в качестве мелиоранта для раскисления плодородных почв и повышения урожайности сельхозкультур;
- осуществлять раскисление почв при рассеивании золы в атмосфере и осаждении ее на поверхность земли;
- использовать золошлаки в качестве высококачественного сырья для производства строительных материалов и дорожных работ (что исключит или ограничит использование речного песка, нарушающее береговую линию и условия существования биоты).

Экологические качества энергетических топлив оцениваются на основе трех групп параметров (рис. 4.1) [4], отражающих:

**1. Исходные экологически значимые свойства топлива — экопотенциал.**

Данная первичная экологическая характеристика топлива не связана с условиями его использования. Она выделяет такие исходные физико-химические и теплотехнические характеристики топлива, которые могут в зависимости от технологии использования на ТЭС и характера окружающей среды определять взаимодействие с окружающей средой самого топлива и конечных продуктов его использования. Экопотенциал топлива характеризуется приведенным содержанием золы, серы, азота в топливе, минералогическим составом минеральной массы, содержанием высокотоксичных веществ — соединений мышьяка, ванадия, различных тяжелых металлов, радиоактивностью, электрическим сопротивлением золы, выходом летучих, составом горючей массы, пылящими свойствами угля и его золы и рядом других показателей;

**2. Экологические последствия энергетического использования конкретного топлива определяются не только массой и видом вы-**

деляемых загрязнителей и отходов, но также соотношением этих показателей со свойствами окружающей среды, их *экосовместимостью*, устойчивостью природной среды к данному виду и уровню техногенного воздействия при сложившемся фоновом загрязнении. Важна также приемлемость и по социально-экономическим показателям.

**Экосовместимость** данного топлива с конкретной окружающей средой оценивается по ущербу в результате техногенного воздействия (при конкретной технологии и объеме использования топлива), либо по затратам на его предупреждение. Этот параметр устанавливает не только целесообразные ограничения исходных характеристик топлива, но также экологически приемлемые технологии использования топлива;

3. Технологические возможности направленного изменения исходных экологически значимых характеристик топлива и продуктов его энергетического использования, затратность таких мероприятий определяют такой показатель, как **экотехнологичность**. Этот показатель, связывая исходные свойства топлива и необходимый уровень направленного воздействия на исходные характеристики топлива и процессы их преобразования при энергетическом использовании, определяет возможность соответствующей технологии нивелировать отдельные экологически неблагоприятные исходные характеристики топлива и обеспечить экологическую безопасность применения данного топлива на конкретной ТЭС.

Экибастузский уголь можно рассматривать как наименее экотехнологичное топливо — при средней зольности  $A' = 41\text{--}42\%$  он наиболее труден для обогащения в силу геологической особенности (перемежающиеся слои угля и породы), крайне сложен для разделения по фракционному составу и плотности, так как представлен в основном в виде сrostков. Тем не менее, имеются технологические решения по обогащению и этого угля с доведением зольности до  $20\text{--}25\%$ .

Наиболее пластичным топливом является природный газ. Для крупных котлов выход оксидов азота при работе на газе превышает  $1,0\text{--}1,3\text{ г/нм}^3$ , т.е. находится на уровне пылеугольных котлов. Однако за счет технологических мероприятий выход оксидов азота в мощных котлах на газе может быть снижен на порядок, в то время как на пылеугольных котлах достижимо снижение на  $60\text{--}65\%$ .



Рис. 4.1. Схема формирования экологических свойств энергетического топлива

**Экологичность топлива** — замыкающий комплексный показатель, отражающий экологические последствия взаимодействия с окружающей природной средой в зоне влияния данной ТЭС. Оптимальное по экологическим показателям топливо для отдельной ТЭС соответствует минимуму удельных затрат на пользование природными ресурсами в данной зоне на нормативном уровне (то есть при обеспечении экологической безопасности применения топлива на данном энергопредприятии).

Экологичность топлива как комплексный показатель включает следующие удельные характеристики:

$E_1$  — удельный ущерб, наносимый окружающей среде при добыче, транспортировке топлива;

$E_2$  — удельные затраты (капитальные, эксплуатационные) на обеспечение нормативов экологической безопасности ТЭС на данной территории по видам воздействия на окружающую среду, связанным со свойствами топлива (ограничение выбросов продуктов сжигания, транспорт и хранение отходов, хранение и подача топлива в пределах ТЭС);

$E_3$  — удельные затраты на пользование природными ресурсами (выбросы загрязнителей в атмосферу, отвод земель для складирования топлива и отходов, загрязнение водных объектов при хранении отходов);

$E_4$  — удельный эколого-экономический эффект за счет:

- нейтрализации влияния смежных источников загрязнения среды (на водные объекты, почвенный слой);

- получения из отходов товарных продуктов, позволяющих уменьшить экологический ущерб в добывающих и перерабатывающих отраслях (сорбенты, строительные материалы, мелиоранты, кристаллическая сера, гипс, сырье для металлургии, материал для облагораживания ландшафта).

Составляющие  $E_1$  и  $E_4$  формируются за пределами ТЭС (в смежных отраслях, в региональном комплексе).

### **4.3. Совершенствование топлива, поставляемого на ТЭС**

---

Ископаемые топлива в большинстве случаев не следует рассматривать как готовый к использованию на ТЭС природный продукт. Нестабильность качества поставляемого топлива существенно затрудняет эксплуатацию оборудования, приводит к максимально завышенным разовым выбросам вредных веществ в атмосферу. Усреднение и направленное смешение различных топлив рассматривается не только как фактор стабилизации технологического процесса, но также как одно из важных мероприятий в решении экологических проблем энергетики. Таким образом, технологические и экологические проблемы предопределяют необходимость специальной подготовки топлива — обогащение, усреднение, десульфуризацию, обеспыливание с доведением исходного топлива до кондиций, обеспечивающих ус-

ловия транспортировки, перегрузки, а также эффективное, экологически безопасное сжигание на ТЭС.

Зарубежный энергетический рынок уже давно перешел на использование обогащенных углей (при обогащении в разы снижается содержание зольной и минеральной долей в угольном топливе). Это, во-первых, благоприятно сказывается на снижении транспортной составляющей в общей цене топлива, тем более что большая часть экспортного угля поступает из Австралии и Южной Африки. А во-вторых, существенно снижает экологически вредные выбросы. На российских угольных электростанциях в основном по-прежнему используются исходные топлива.

#### **4.3.1. Стабилизация и направленное изменение качества угля усреднением и смешением углей**

Широко распространенным способом стабилизации и формирования заданного качества угля для ТЭС является смешение углей различных марок, различных месторождений с различными характеристиками [5]. Эта система позволяет, изменяя соотношения углей в смеси и комбинации различных углей, программировать качество угольной смеси. Для энергетики Урала значимость подобного решения проблемы топливоснабжения связана с поступлением в регион широкого спектра углей: Кузбасса, Экибастуза (нестабильного качества), канско-ачинских углей (в перспективе возможны поступления значительных количеств), местных углей Свердловской области, например Волчанского (необходимость использования этих низкокачественных углей определяется социально-экономическими условиями добывающих территорий).

Регулирование качества сжигаемого угля организуется:

- *усреднением* характеристик сжигаемого твердого топлива, при этом получается смесь углей однородного качества;
- *смешением* в определенном соотношении углей с различными характеристиками для направленного формирования определенных характеристик смеси углей соответственно технологическим и экологическим требованиям; в итоге формируется смесь заданного качества.

Целенаправленное формирование смесей углей осуществляется с целью:

- улучшения условий воспламенения (например, смесь реакционно-активного угля и тощего угля);



- ограничения выбросов оксидов азота за счет поглощения кальциевой золой, обеспечивается подмешиванием углей с высококальцевой минеральной составляющей;
- ограничения шлакования;
- уменьшения выбросов золы и образования золошлаковых отходов.

Направленное формирование смесей позволяет получать приемлемые показатели не только по исходным показателям — по выходу летучих, удельной теплоте сгорания, содержанию токсичных веществ (соединений азота, серы), но также по показателям рабочего процесса — условиям шлакования, взрываемости, качеству золошлаков, выбросам загрязняющих веществ с дымовыми газами. Исследования УралВТИ позволяют прогнозировать качество смесей углей по их шлакующей способности. Однако такие важные для энергетического использования показатели качества смеси, как взрываемость, самовозгорание при хранении в штабеле, складываются не в соответствии с весовой пропорцией отдельных углей в смеси. Поэтому при механическом смешении углей различных месторождений с различными характеристиками программировать качество угольной смеси можно исходя из взаимодействия углей в смеси на различных стадиях топочного процесса, в конвективной шахте, системах золоулавливания и складирования золошлаков.

В мировой энергетике стабилизация качества угля путем смешения различных углей рассматривается как одно из важных мероприятий в решении экологических проблем энергетики. Смесительные устройства могут использоваться на каждой ТЭС, как в США, или как в Дании на едином общегосударственном угольном усреднительном комплексе, покрывающем потребности энергетики страны.

Применительно к условиям российской энергетики представляется возможным реализовать усреднение и стабилизацию качества сжигаемого угля следующим образом:

1. Решение проблемы стабилизации качества угля в масштабе отрасли посредством законодательного регулирования качества угля, поставляемого на федеральный топливный рынок. В соответствии с этим поставщики и производители угля должны осуществлять смешение углей от различных шахт, различных разрезов в усреднительных комплексах на местах добычи угля.

2. Целесообразно в рамках совершенствования структуры регионального энергетического комплекса создавать единый региональный угольный смесительный комплекс, который, принимая широкий

спектр углей, поставляет угольные композиции заданного стабильного состава. Для решения этой актуальной проблемы необходима проработка ряда вопросов:

- оценка потоков угля, вовлекаемых в формирование угольных смесей;
- оптимальное размещение регионального усреднительного комплекса с учетом транспортных, экономических и экологических аспектов;
- разработка программного обеспечения системы формирования смесей для автоматизации процессов подготовки смесей;
- анализ топливного хозяйства, котельного оборудования, систем золоулавливания и складирования золошлаков энергопредприятий региона для оценки возможного диапазона создаваемых угольных смесей.

3. Наиболее экономичным способом регулирования качества угля непосредственно на ТЭС является пластовая технология складирования топлив различного качества, при которой топливо с различными характеристиками укладывается в штабель слоями поочередно по заданной программе.

#### **4.3.2. Обогащение углей деминерализацией на специализированных предприятиях**

Угли, которые являются продуктом осадочно-растительного происхождения, содержат негорючие минеральные примеси, определяющие зольность топлива. Масса угля состоит из кусков практически чистого топлива (углеродной массы), кусков породы, свободной от угля, и кусков смешанного состава, включающих органическую и минеральную массу (сростки). Чем более равномерно распределены минеральные вещества в органической массе, тем труднее обогащать топливо.

Основные преимущества деминерализации топлива состоят в том, что увеличивается КПД производства электроэнергии (на 2–4 % при снижении  $A_r$  на 10 %) и уменьшается или исключается расход мазута на подсветку факела.

Глубокая деминерализация угля путем механического обогащения без изменения состава и состояния органического вещества является одной из наиболее доступных и реализуемых на практике технологий подготовки угля к сжиганию в энергетических топках. В мировой энергетике для ТЭС используются только обогащенные угли с зольностью до 18 %.

По данным на начало 90-х гг. в России более 60 % добываемого угля было охвачено различными видами переработки — обогащением в минеральных суспензиях, гидравлической отсадкой, методом флотации. Распространение получил пневматический метод обогащения для высокозольных и высокосернистых бурых углей. Наиболее качественные продукты обогащения служат технологическим сырьем в металлургии. К 2005 г. доля обогащаемого угля не превышала 15 %. Объемы обогащения энергетических углей в последние годы устойчиво возрастают и составляют около 25 % суммарной добычи энергетических углей. Однако весь обогащенный уголь направляется на экспорт.

Качество угля, поступающего на ТЭС России, в основном, не удовлетворяет современным представлениям об экологически приемлемом топливе. Например, для энергетики Свердловской области актуальным является обогащение экибастузских углей со снижением зольности.

В зависимости от направленности обогащения угля (экологическая либо энергетическая эффективность) складываются различные требования к характеру и степени деминерализации угля.

*Экологическая эффективность* обогащения угля:

- снижение содержания в дымовых газах  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , золовых частиц;

- сокращение транспортных затрат при перевозке балластных негорючих компонентов угля.

*Энергетическая эффективность:*

- сверхчистые угольные концентраты могут использоваться в качестве топлива в камерах сгорания ГТУ, для этого частицы угля не должны превышать по размеру 10 мкм, следует также исключить присутствие тугоплавких минеральных компонентов (кальция, магния, железа);

- снижение общей зольности для повышения КПД котлоагрегата, стабильности режима и надежности оборудования.

#### **4.4. Организация подготовки топлива в рамках технологического цикла ТЭС**

---

Составной частью повышения экономичности и экологичности технологии энергопроизводства в условиях действующей ТЭС является целенаправленная подготовка топлива к сжиганию после его подачи со склада. Подготовка топлива позволяет в широком диапазоне

управлять процессами воспламенения, выгорания, шлакования, выделения оксидов азота и других загрязнителей в результате следующих технологических операций:

а) регулирование качества размола угля:

- утонение помола угольной пыли вплоть до микропомола для интенсификации воспламенения и горения топлива в начальном участке факела с минимальным избытком воздуха;

- загрубление помола угля вплоть до отказа от использования пылевидного топлива и использования крупнофракционного дробленного угля с переходом в режим низкотемпературного вихревого сжигания;

б) активация угольных частиц для ускорения воспламенения и выгорания основной части угольной пыли в зоне с пониженным избытком воздуха:

- механическая активация в процессе ударного размола;
- термическая активация воздействием плазмы;
- использование полукокса в качестве высокореакционного топлива;

в) облагораживание топлива:

- предварительная термохимическая обработка топлива с активацией поверхности топливных частиц, уменьшением содержания связанного азота топлива;

- сжигание мазута в виде тонкодиспергированной водомазутной эмульсии;

- десульфуризация угольной пыли.

## **4.5. Подготовка высоковлажных топлив к сжиганию**

---

Сжигание высоковлажных углей связано с рядом проблем в организации топочного процесса и экономичности работы котла:

- большие потери теплоты с уходящими газами (потери с теплотой парообразования и физическим теплом влаги);

- низкая температура горения;

- большие затраты энергии на собственные нужды в связи с увеличенным объемом дымовых газов.

Использование высоковлажных углей требует решения задачи повышения надежности работы ТЭС (предупреждение проблем при транс-

портировке, разгрузке топлива и на топливоподаче), а также улучшения технико-экономических показателей (за счет снижения затрат на испарение влаги топлива, на которое уходит при влажности 50 % около 25 % потенциальной теплоты используемого топлива). Существует ряд технологических приемов, реализуемых в различном конструктивном оформлении:

- контактная газовая подсушка топлива до ввода его в топку, осуществляемая в процессе размола, при поступлении топлива в шахтное устройство путем фильтрации дымовых газов через слой топлива;
- ввод испаренной влаги топлива вместе с сушильным агентом в топку через каналы основных горелок, через сбросные сопла в плоскости установки основных горелок, через сбросные сопла над основными горелками выше ядра пылеугольного факела;
- кондуктивный подогрев угля в трубчатом теплообменнике (барабанная сушилка) с использованием в качестве теплоносителя отработанного пара турбины, конденсацией испаренной влаги после барабанной сушилки и выводом ее из цикла. При обогреве барабанной сушилки низкопотенциальным отборным паром расход теплоты на испарение влаги втрое ниже, чем при испарении в топке котла [6];
- полное исключение поступления влаги угля в топку (испаренной в процессе предварительной сушки и при досушке в процессе размола) в разомкнутой пылесистеме со сбросом отработавшего сушильного агента в атмосферу.

В последнее время разработаны новые методы удаления влаги из топлива:

- механические методы с использованием прессов;
- гидродинамические методы с применением центрифуг.

#### **4.5.1. Предварительная подсушка топлива топочными газами**

Впервые задача сжигания высоковлажных топлив решалась в 20-х гг. XX в. применительно к сжиганию в слоевых топках древесины, торфа с обеспечением устойчивого воспламенения топлива на решетке и полного его выгорания. Как и в последующие десятилетия, это достигалось предварительной подсушкой топлива до поступления в основную зону горения (то есть на решетку) и отводом испаренной влаги из зоны горения. Характерным топочным устройством такого типа является топка В. В. Померанцева для сжигания древесных отходов (рис. 4.2) [7].

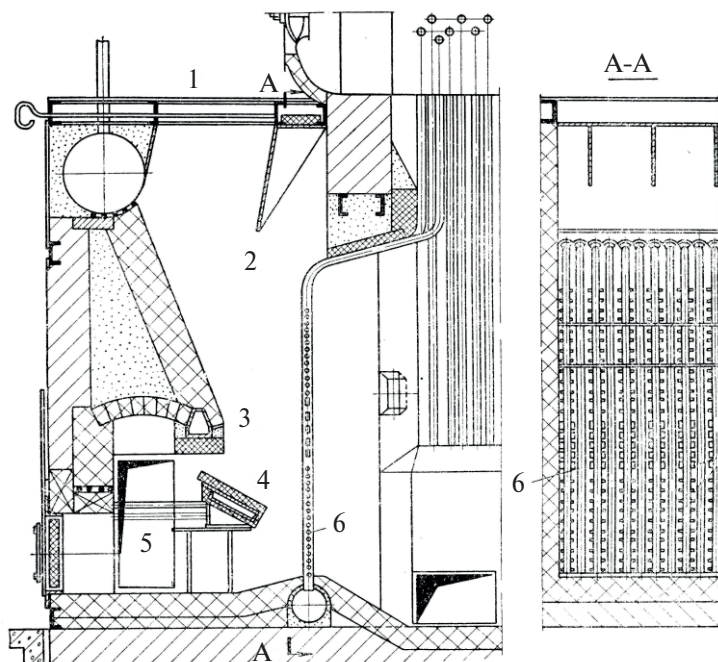


Рис. 4.2. Топка системы В. В. Померанцева:

1 — короб топливоподающий, 2 — шахта подсушки топлива, 3 — пережим, 4 — направляющий порожек, 5 — воздушный канал, 6 — решетка (ошипованные трубы разделительного экрана)

Топка состоит из вертикальной шахты 2, разделенной по высоте на две зоны пережимом 3. Над шахтой размещена загрузочная камера. Шахта отделена от конвективной части котла трубной решеткой 6, образующей топочный экран из ошипованных труб. Эта трубная система препятствует выносу мелких фракций топлива в топочную камеру. В верхней части шахты происходит подсушка топлива, а в нижней — горение его. Слой топлива, задерживаясь в пережиме 3, покоится на порожке 4, поддерживается решеткой 6. В этой зоне реализуется процесс слоевого сжигания. Воздух поступает под слой топлива от короба 5, дымовые газы отводятся в топочную камеру через межтрубные зазоры решетки 6. Испаренная влага удаляется из шахты в загрузочную камеру и далее в атмосферу. Предельно допустимая влажность топлива — 60 %. Размер кусков древесины до 100 мм. Таким образом, в этих конструкциях слоевых топков предотвращается поступление зна-

чительной части испаряемой влаги топлива в зону активного горения в слое и в топочную камеру.

На последующем этапе развития топочной техники этот принцип организации топочного процесса вновь станет актуальным при сжигании новых видов высоковлажных углей в пылеугольных камерных топках, например при использовании нисходящей сушки топлива перед подачей его в мельницу (рис. 4.3) [8].

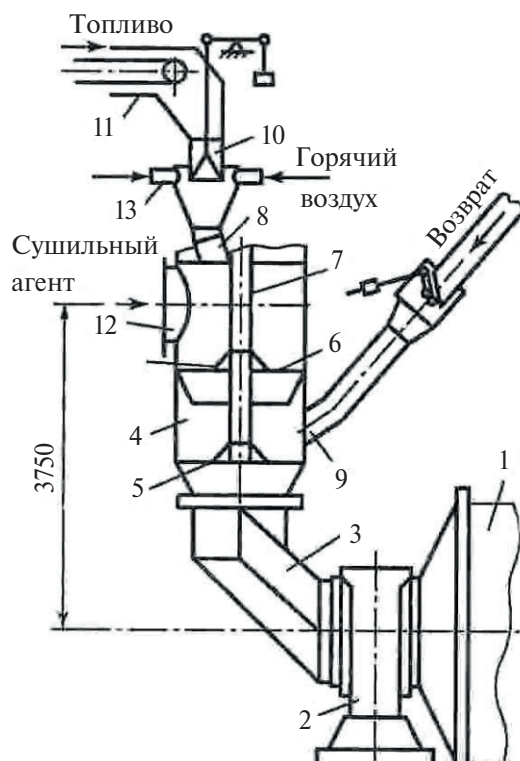


Рис. 4.3. Устройство для нисходящей сушки топлива:

- 1 — мельница ШБМ, 2 — подшипник, 3 — приемный патрубок, 4 — корпус, 5 — конус, 6 — конусная тарелка, 7 — опорная труба, 8 — течка сырого угля, 9 — течка возврата, 10 — конусная мигалка, 11 — ленточный питатель, 12 — подвод сушильного агента, 13 — подвод горячего воздуха

Предварительная сушка топлива стала обязательным технологическим элементом подготовки топлива, совмещаясь с процессом его размола либо обеспечивая его сушку в отдельных сушильных аппаратах барабанного типа (рис. 4.4).



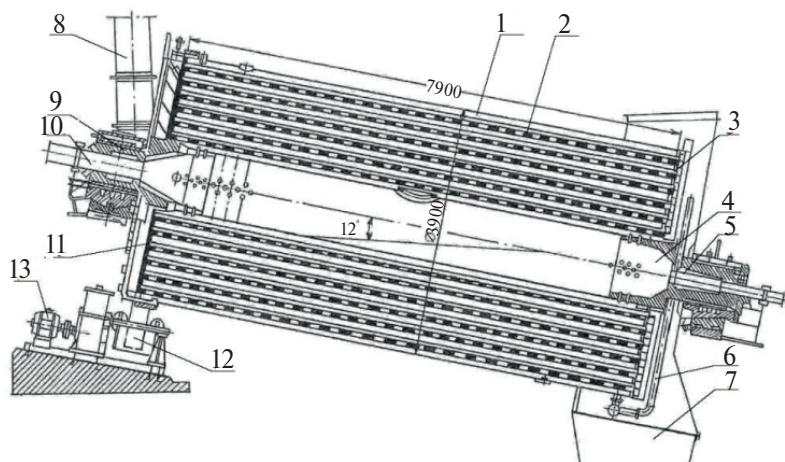


Рис. 4.4. Барабанная паровая сушилка угля:

- 1 — наклонный корпус, 2 — трубная система, по которой перемещается уголь,  
 3 — трубная доска для крепления труб, 4 — центральный вал,  
 5 — упорный подшипник, 6 — сборник конденсата, 7 — отвод сухого угля,  
 8 — подвод сырого угля, 9 — подшипник опорный, 10 — подвод пара,  
 11 — трубная доска, 12 — привод фрикционный, 13 — электродвигатель привода

Целью сушки исходного топлива при факельном сжигании является обеспечение влажности угольной пыли, соответствующей определенному диапазону для каждого угля: по условиям возгорания следует избегать пересушивания пыли, поддерживая влажность пыли по условиям надежности системы транспортировки угля и угольной пыли. Этим требованиям соответствует определенная температура готовой пыли после мельницы: для каменных и бурых углей — 70 °С, для тощих углей, экибастузского угля — 130–150 °С.

#### 4.5.2. Предварительная подсушка топлива с пылеконцентратором

В середине 50-х гг. за рубежом и в СССР начали разрабатываться и применяться простые и надежные схемы сжигания низкокалорийных, высоковлажных топлив с предварительным разделением пылегазового потока за размольным устройством на высококонцентрированную аэрозоль, поступающую в ядро горения, и слабозапыленный сушильный агент, подаваемый в верхнюю часть топки (рис. 4.5, 4.6). Главным элементом этих схем является пылеконцентратор, осуществ-

вляющий разделение потоков пылевзвеси за мельницей. При этом используются прямоточные инерционные и центробежные аппараты. Таким путем удавалось при наличии пылесистемы прямого вдувания выделить с помощью пылеконцентратора легковоспламеняемую часть пылевоздушного потока с последующим вводом за высокотемпературным факелом оставшейся обедненной части аэросмеси. Эта технология была использована при сжигании башкирских и дальневосточных бурых углей в топках с сухим шлакоудалением, а также канско-ачинских бурых углей в топках с жидким шлакоудалением.

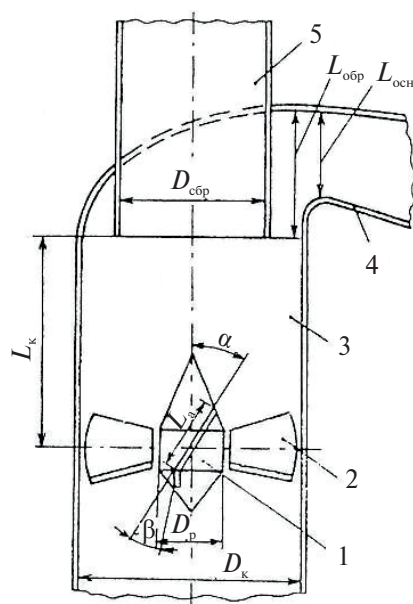


Рис. 4.5. Схема пылеконцентратора:

1 — раскататель, 2 — завихритель, 3 — корпус,  
4 — основной отвод, 5 — сбросной отвод

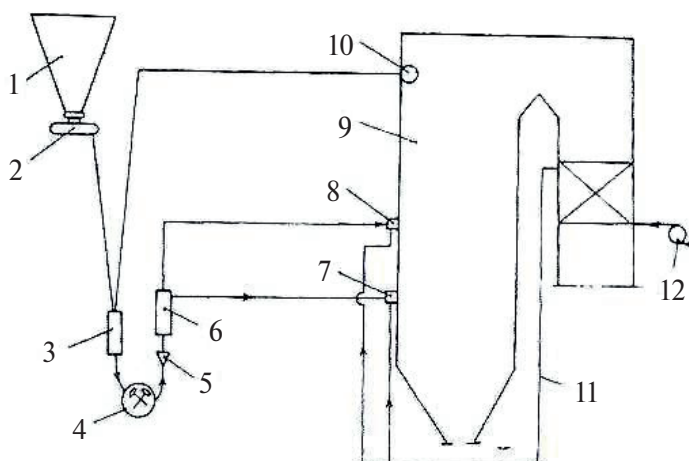


Рис. 4.6. Система пылеприготовления с пылеконцентратором:

1 — бункер сырого угля, 2 — питатель сырого угля, 3 — устройство для нисходящей сушки, 4 — мельница, 5 — сепаратор, 6 — прямоточный пылеконцентратор,  
7 — основная пылеугольная горелка, 8 — сбросная горелка, 9 — топка,  
10 — газозаборное окно; 11 — воздуховод, 12 — дутьевой вентилятор

Ограничивающим фактором при организации процесса с сухим шлакоудалением является бесшлаковочное ведение режима, поэтому важно при наладке процесса обеспечить минимальное значение температуры факела, достаточное для стабильного горения. В то же время при сжигании низкореакционного топлива с тугоплавкой золой необходимо стремиться к наиболее высокой температуре факела.

При сохранении всех преимуществ пылесистем прямого вдувания эти схемы обеспечивают надежное сжигание топлив с рабочей влажностью до 70 % и низшей теплотой сгорания до 1200 ккал/кг. Эти системы использовались в отечественной энергетике:

- в топках с жидким шлакоудалением для улучшения схода шлакового расплава при сжигании бурых канско-ачинских углей с легкоплавкой золой, содержащей большое количество оксида кальция;
- при сжигании башкирского бурого угля (Кумертауская ТЭЦ), чихезского бурого угля (Владивостокская ТЭЦ-2), бикинского бурого угля (Приморская ГРЭС) для повышения устойчивости горения, расширения диапазона рабочих режимов топки.

В зарубежном котлостроении схемы с пылеконцентраторами уже давно получили широкое распространение при сжигании низкосортных топлив для блоков мощностью до 500 МВт. Схемы прямого вдувания с пылеконцентраторами нашли применение на ряде станций ФРГ (блоки до 300 МВт), Польши (котлы 640 т/ч, ТЭС Туров), ГДР (блоки 500 МВт), Болгарии (котлы 250 и 670 т/ч, ТЭС «Марица-Восток») и других европейских стран. Во всех этих объектах распределение топлива и сушильного агента между основными и сбросными горелками осуществлялось в соотношении:

топливо —  $(0,85-0,9)/(0,15-0,1)$ ;

сушильный агент —  $(0,35-0,65)/(0,65-0,35)$ .

Технология применения пылеконцентраторов в топочных устройствах излагается в отраслевых нормативных и методических документах [9].

#### **4.5.3. Сброс сушильного агента в топку вне ядра топочного факела при наличии пылесистемы с промбункером и при прямом вдувании аэросмеси**

При сжигании тощих углей в котлах, оснащенных пылесистемой с промбункером пыли, организуется пространственное размежевание основных горелок и сбросных сопел в топке. Оно осуществляется сме-

щением высотной отметки установки сбросных сопел относительно основных горелок. При этом сравнительно холодные потоки отработавшего сушильного агента поступают в зону завершения основного факельного процесса, где играют роль третичного дутья. Это существенно повышает устойчивость факела и полноту выгорания топлива. Так, на котлах ТПП-110 и ТПП-210, работающих на АШ, в заводском исполнении сброс отработавшего сушильного агента ( $100\text{--}130^\circ\text{C}$ ) в топку осуществлялся через сопла на уровне основных горелок. Захлаживание при этом ядра факела основных горелок приводило к дестабилизации горения угольной пыли. При смещении сбросных сопел на  $2,5\text{--}3,0$  м выше отметки основных горелок значение механического недожога  $q_4$  снизилось в  $2,0\text{--}2,5$  раза.

Таким образом, продолжается развитие технологии сжигания высоковлажных топлив, которая предусматривает ввод всей влаги топлива в топочную камеру, но сосредотачивая его в основном в верхней части топки, вне ядра факела. Как показано выше, такая же схема реализуется и при прямом вдувании аэросмеси в топку. В этом случае используется центробежный пылеконцентратор, устанавливаемый на пылепроводе перед горелкой, наибольшая часть капельной влаги отводится в верхнюю часть топки.

Наряду с этим разрабатываются схемы пылеприготовления с предварительной подсушкой высоковлажного дробленного угля (до  $18\text{--}20\%$  при начальной влажности  $38\text{--}40\%$ ) в паровой сушилке с конденсацией влаги после сушилки (рис. 4.7). Они применимы как при прямом вдувании аэросмеси в топку, так и в пылесистемах с промбункером. Эта схема уже не только решает задачу устойчивого и эффективного сжигания высоковлажных углей за счет ограничения поступления влаги в ядро горения, но также обеспечивает повышение технико-экономических показателей котла за счет ограничения поступления испаренной влаги в топку. Повышение КПД котла при этом может достигать  $2\%$ . Наряду с этим сокращаются габариты котла, металлоемкость вследствие уменьшения объема топочных газов, поступающих в конвективную шахту.

Это, по существу, развитие принципа ограничения влияния влаги на условия сжигания топлива путем вывода части испаренной влаги в атмосферу, минуя топочную камеру, — принципа, использованного в топке Померанцева.

Как видно из приведенного обзора развития технологии сжигания высоковлажных углей, непрерывный процесс совершенствования тех-

нологии идет по спирали, решая эти проблемы в новых условиях с опорой на предшествующий многотрудный опыт.

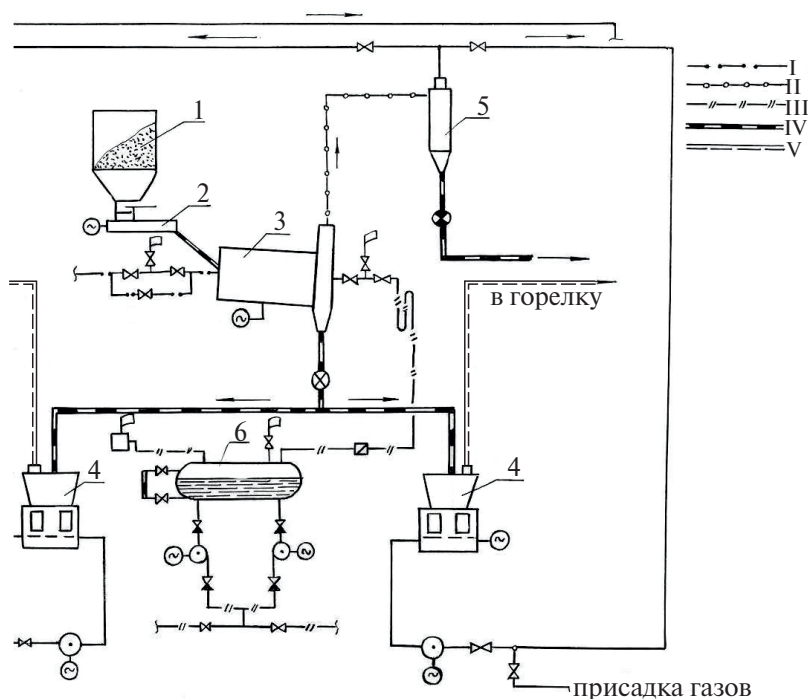


Рис. 4.7. Схема пылеприготовления с предварительной подсушкой высоковлажного дробленого угля в паровой сушилке и конденсацией испаренной влаги:

1 — бункер, 2 — питатель, 3 — паровая сушилка, 4 — мельница, 5 — циклон, 6 — конденсатосборник; рабочие среды: I — пар, II — паровоздушная смесь, III — конденсат, IV — уголь, V — аэросмесь

## 4.6. Десульфуризация энергетических топлив непосредственно в рамках технологического процесса ТЭС

### 4.6.1. Десульфуризация мазута

Основным способом снижения выбросов соединений серы при использовании мазута следует считать предварительную десульфуризацию мазута непосредственно у производителей нефтепродуктов. Для

десульфуризации мазута разработаны и используются различные технологические процессы: каталитическая гидрообработка при повышенных температуре и давлении, вакуумная перегонка с последующей гидроочисткой наиболее легких компонентов, отделяемых при вакуумной перегонке, и вновь смешение обессеренной части мазута с наиболее тяжелой частью нефтяных остатков, не прошедших десульфуризацию.

При подготовке мазута к сжиганию непосредственно на ТЭС осуществляется ввод присадок на основе магния, кальция, алюминия, которые:

- обеспечивают повышение точки плавления золы мазута для уменьшения высокотемпературной коррозии;
- нейтрализуют  $\text{SO}_3$  с уменьшением низкотемпературной коррозии.

#### 4.6.2. Десульфуризация угольной пыли

Десульфуризация углей непосредственно на ТЭС может осуществляться при обработке мелкодисперсного угля. Органическая сера химически связана с углеродной массой топлива и не может быть выделена без его глубокой переработки. Основным носителем неорганической серы является сульфидная сера — дисульфиды железа  $\text{FeS}_2$  (серный колчедан). Этот компонент минеральной части угля является основной целью механического извлечения. Минералогические модификации  $\text{FeS}_2$  (пирит, марказит, мельниковит) обладают существенно различными физико-химическими свойствами, определяющими возможность их извлечения. Большая часть их (до 60–75 %) представлена тонкодисперсными включениями — до 20–30 мкм. Рассредоточенность в угольной массе мелкодисперсного дисульфида железа, высокая плотность ( $4,9\text{--}5,0\text{ г/см}^3$ ) определяют принципы механической десульфуризации — тонкодисперсный помол для вскрытия тонкодисперсных включений  $\text{FeS}_2$ , сепарация по плотности основной угольной массы и дисульфида железа.

Две эти задачи трудносовместимы, поскольку тонкодисперсная пыль трудно поддается традиционным способам разделения, основанным на различии плотности (гравитационным, центробежным, пневматическим). Такие условия частично складываются в существующих системах пылеприготовления при выделении угрубленных



частиц в сепараторе за шаровой барабанной мельницей — содержание  $\text{FeS}_2$  в возврате повышено в два раза по сравнению с исходным топливом. Дополнительная десульфуризация циркуляционного возврата, поступающего из сепаратора, позволяет снизить содержание серы в пыли, подаваемой на повторное измельчение в ШБМ. Такая схема может быть использована для переработки высокосернистых углей.

## 4.7. Термохимическая обработка угля

Термохимическая обработка угля — один из эффективных способов облагораживания твердого топлива для ТЭС. Она может быть реализована на месте добычи угля для транспортировки топлива к энергопредприятиям уже в облагороженном виде. Твердый остаток термообработки при температуре 650–850 °С без доступа окислителя представляет собой полукокс, в котором сохраняется лишь небольшая часть связанного азота в виде наиболее термостойких соединений. Сжигание модифицированного энергетического топлива снижает выход оксидов азота по крайней мере вдвое. Использование такой технологии облагораживания угля в промышленных масштабах в нашей стране не организовано.

Процесс термической обработки угольных частиц с выделением летучих развивается в топочной камере, предшествуя воспламенению парогазовых продуктов разложения углеродной массы и последующему воспламенению коксового остатка. Пространственное размежевание этих процессов проявляется наиболее четко при замедленном смешении аэросмеси с воздухом. Предварительная термообработка топлива непосредственно перед вводом в топку меняет характер процессов в пылеугольном факеле — в топочную камеру поступают разделенные конечные продукты термообработки: летучие горючие и коксовый остаток, содержащий некоторое остаточное количество летучих соединений.

Анализ известных исследований [10–13] позволяет выделить основные закономерности трансформации связанного азота топлива при нагреве:

- основная часть азота при нагреве угля выделяется в свободном виде (до 50 % связанного азота угля) и в виде аммиака (15–18 % общего количества топливного азота), а также низкомолекулярных азотистых соединений;



- наиболее интенсивно свободный азот выделяется в двух температурных зонах: до 500 °С и в интервале 700–800 °С;
- с ускорением нагрева выход свободного азота в интервале температур до 500 °С увеличивается, а при температурах свыше 700 °С снижается;
- весь азот, содержащийся в топливе, входит в состав его органической массы, в минеральной части угля азот практически отсутствует. Поэтому выход  $\text{NO}_x$  за счет окисления азота топлива зависит от реакционной способности угля. При большом выходе летучих основная часть азота топлива переходит в газовую фазу. Для малореакционных углей доля азота топлива, переходящего в оксиды азота, существенно ниже;
- в результате термообработки топливный азот перераспределяется между коксовым остатком и летучими. В последних он содержится главным образом в виде свободного азота и аммиака и в небольших количествах в виде других соединений. Это распределение существенно зависит от качества и природы угля. Если для каменных углей около 60 % азота угля остается в коксе, остальное выводится с летучими, то для бурых углей с большим выходом летучих в коксовом остатке обнаруживается не более 12–20 % исходного количества азота.

При организации направленного термического разрушения неустойчивых азотосодержащих соединений низкотемпературная термообработка угля позволяет избежать образования канцерогенных веществ при высокотемпературной газификации.

Уже с 60-х гг. прошлого века проводились работы по огневой подготовке низкорекционных топлив непосредственно перед вводом аэросмеси в горелку. Практически первой реальной системой огневой подготовки угольной пыли явилось опытное устройство со встроенной в пылепровод мазутной форсункой (1960 г.) [14], показанное на рис. 4.8.

В 90-х гг. XX в. была разработана и реализована встроенная система узлов подогрева угольной пыли (ВСП), вмонтированных в полость угольных горелок [15; 16] (рис. 4.9, 4.10). В рабочем канале развиваются три основных процесса, обеспечивающих расчетный режим термообработки угольной пыли: догорание вспомогательного топлива, смешение угольной пыли с высокотемпературными продуктами сгорания вспомогательного топлива, подогрев частиц угля и выделение летучих. К ВСП подводятся трубопроводы: природно-

го газа (расход — 2,5–3 % от расчетного расхода основного топлива на котел), воздуха на сжигание вспомогательного топлива, высококонцентрированной аэроsmеси.

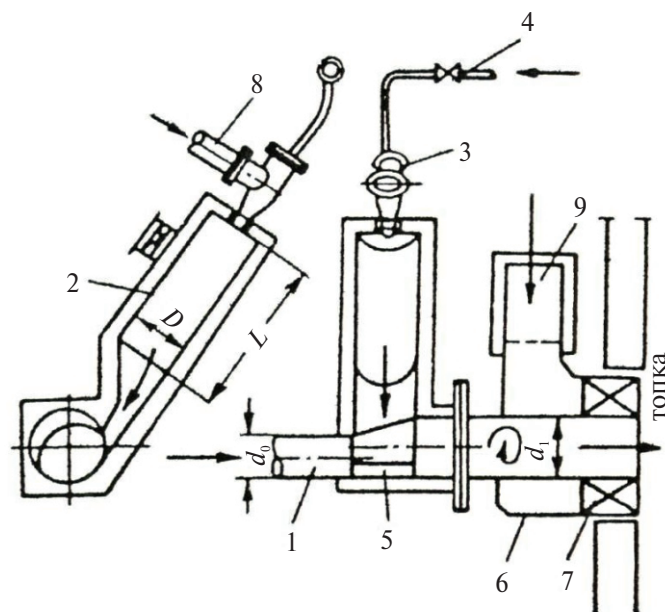


Рис. 4.8. Встроенная установка подогрева угольной пыли мазутом:

1 — пылепровод аэроsmеси, 2 — камера сгорания, 3 — газовая или мазутная форсунка, 4 — подача газа или мазута, 5 — смеситель, 6 — основная горелка, 7 — лопаточный аппарат, 8 — первичный воздух к форсунке, 9 — горячий (вторичный) воздух. Топливо — егоршинский антрацит  $Q = 24,6$  МДж/кг,  $V^{daf} = 8-9\%$ ; вспомогательное топливо — мазут

Камера сжигания вспомогательного топлива включает наружный корпус 1 с патрубком ввода воздуха, связанный фланцевым соединением с начальным участком рабочего канала, патрубок ввода природного газа 3, цилиндрическую камеру горения 2, кольцевую газовую горелку 4, центральный пылеподающий патрубок 5 с коническим насадком в выходном сечении. Такая конструкция преследовала две цели: стабилизация топочного процесса (воспламенения, выгорания, эвакуации жидкого шлака) с учетом возможного поступления партий угля ухудшенного качества (с малым выходом летучих, с пониженной удельной теплотой сгорания) и снижение выхода оксидов азота.

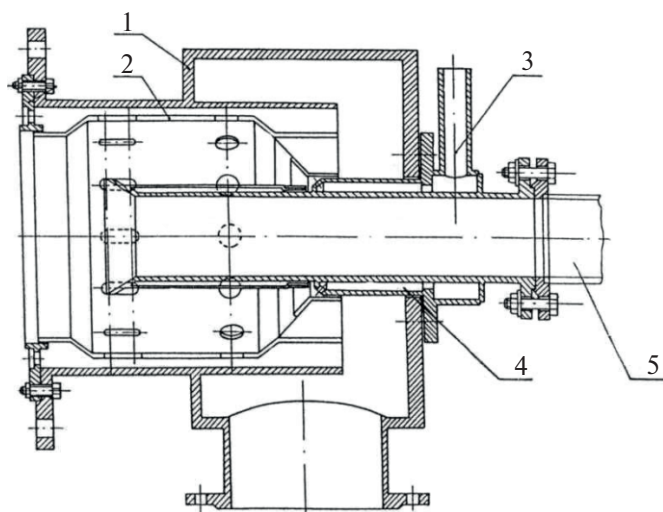


Рис. 4.9. Камера сжигания вспомогательного топлива:

1 — корпус камеры сжигания; 2 — пламенная труба;  
3 — подвод вспомогательного топлива (природный газ); 4 — горелка газовая  
кольцевая; 5 — пылеподводящий патрубок

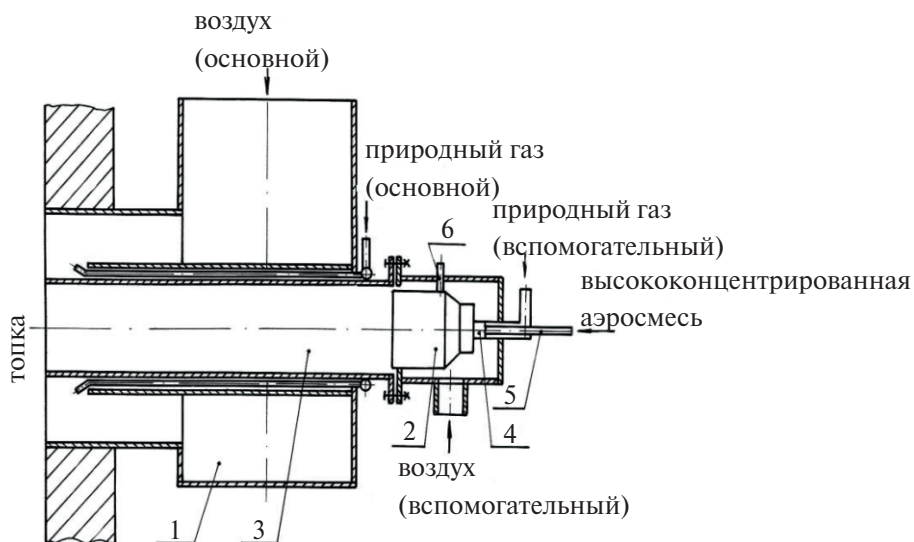


Рис. 4.10. Установка встроенного узла подогрева угольной пыли  
в полости пылегазовой горелки котла:

1 — штатная пылегазовая горелка котла; 2 — камера сжигания  
вспомогательного топлива; 3 — рабочий канал узла подогрева пыли;  
4 — вспомогательная горелка; 5 — пылеподводящий патрубок;  
6 — запальное устройство

Система предварительного подогрева пыли кузнецкого угля со встроенными в горелки узлами подогрева была установлена на котле типа ТП-87 паропроизводительностью 420 т/ч (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Штатная пылегазовая горелка котла ТП-87, оснащенная встроенным узлом подогрева пыли

Выявленные в ходе испытаний и опытной эксплуатации характеристики ВСП и топочно-горелочной системы в режиме подогрева пыли показали:

- надежность конструкции ВСП;
- надежность горелки с ВСП — после 1000 часов эксплуатации горелки не выявлено каких-либо изменений в состоянии амбразур, металлоконструкций горелки;
- устойчивость факела при сжигании подогретой угольной пыли — отсутствие заметных пульсационных явлений, возможность сжигания тощих углей (по опыту сжигания партии угля с выходом летучих около 11 %);
- стабильный сход жидкого шлака;
- полнота выгорания подогретой угольной пыли соответствует требованиям режимной карты;
- не выявлены специфические особенности формирования золовых отложений при подогреве пыли.

Экологическая эффективность системы подогрева пыли во встроенных устройствах подтвердилась при длительной опытной эксплуатации на котле ТП-87 (рис. 4.12).

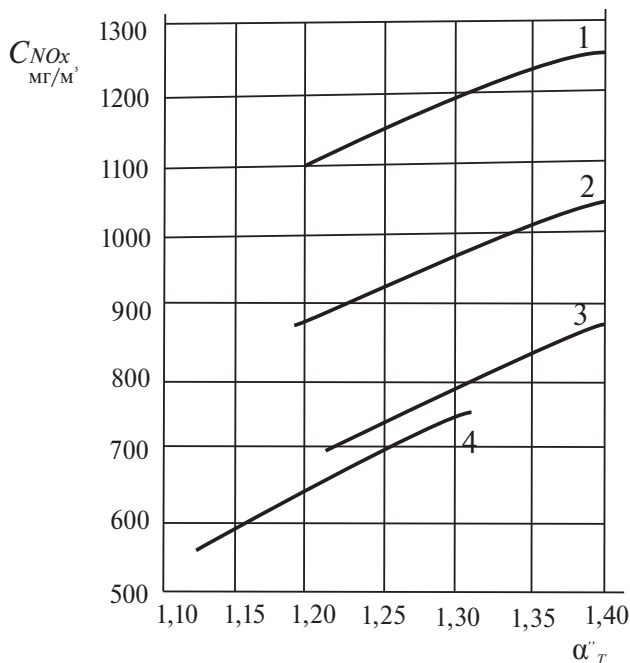


Рис. 4.12. Выход оксидов азота при различных способах сжигания высококонцентрированной аэросмеси в топке котла ТП-87

- 1 — штатные вихревые горелки исходной конструкции;
- 2 — горелки, переоборудованные на сжигание ПВК и оснащенные ВСП, при отключенной подаче вспомогательного топлива;
- 3 — горелки, переоборудованные на сжигание ПВК и оснащенные ВСП, в режиме подогрева пыли (600 °С);
- 4 — работа котла на природном газе

До перехода котла на сжигание высококонцентрированной аэросмеси и установки ВСП значение  $C_{NO_x}$  в рабочем диапазоне режимов составляло 1800–2100 мг/м<sup>3</sup>. Переход на сжигание высококонцентрированной аэросмеси позволил снизить концентрацию оксидов азота в дымовых газах до 1180–1230 мг/м<sup>3</sup>. Затем, с установкой ПВК, концентрация оксидов азота в дымовых газах составляет 780–860 мг/м<sup>3</sup>, что соответствует режиму сжигания природного газа при идентичном избытке воздуха (рис. 4.12). Это указывает на практически полное предотвращение образования топливных оксидов азота.

Предварительная термическая обработка угля может реализоваться различными путями. В исследованиях отечественных специалистов рассматривались различные технические решения.

1) Термическое облагораживание углей (в частности, Канско-Ачинского бассейна) в мощных комплексах непосредственно в местах добычи с получением и поставкой на ТЭС полукокса [17; 18].

2) Газификация твердого топлива в специальных газогенераторах. Однако в настоящее время работы в этом направлении не вышли за рамки демонстрационных установок [19].

3) Разработка проекта котла Е-500 паропроизводительностью 500 т/ч (СибВТИ) с пылеподогревателем [20]. В котле через газозаборные окна в стенке топочной камеры в подогреватель пыли поступают горячие дымовые газы (рис. 4.13). Они способствуют подогреву угольных частиц в движущемся слое топлива, воспламенению части его, за счет чего осуществляется нагрев всей массы угля в слое до температуры 800–900 °С. Проект не реализован.

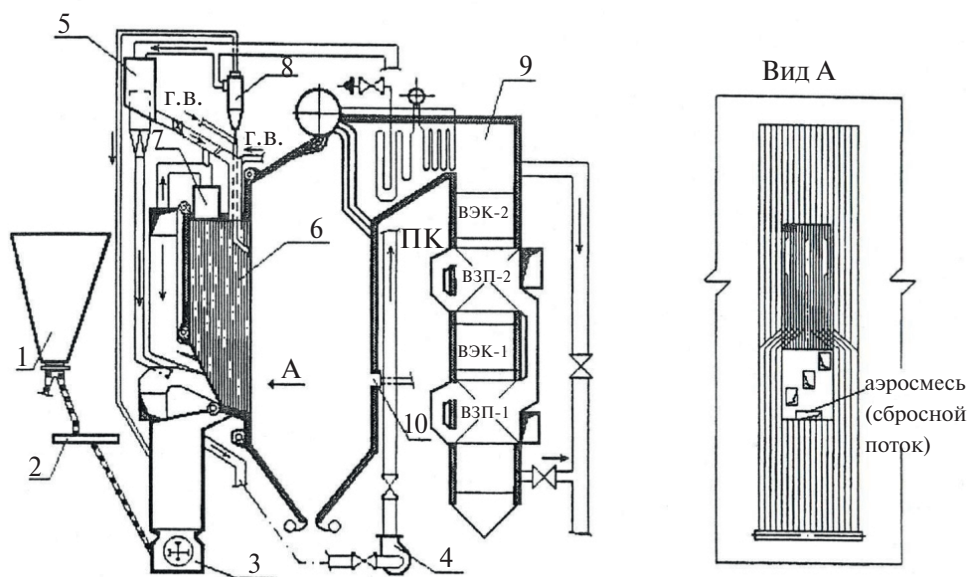


Рис. 4.13. Опытно-промышленная установка высокотемпературного подогрева на котле ТП-35У (СибВТИ):

- 1 — бункер сырого угля; 2 — питатель сырого угля; 3 — мельница;  
 4 — мельничный вентилятор; 5 — пылеконцентратор; 6 — пылеподогреватель;  
 7 — муфельная горелка с ЭЗУ; 8 — циклон; 9 — котел ТП-35У;  
 10 — сопло заднего дутья



Пространственное разделение процессов термообработки и сжигания угля позволяет сделать процесс подавления оксидов азота более управляемым и эффективным. Проведенные исследования и практический опыт показывают, что предварительная термическая подготовка топлива непосредственно перед подачей в топку является реальным способом технологического и экологического совершенствования пылеугольных котлов.

#### **4.8. Подготовка водоугольного топлива для сжигания в топке энергетического котла**

Водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой мелкодисперсную смесь (суспензию) измельченного угля (60–70 %), воды (29–39 %) и стабилизирующей добавки — пластификатора (1 %). Для всех технологий приготовления ВУТ необходимо предварительное дробление угля до фракции 10–12 мм. Выделяют следующие основные способы помола:

- в процессе размола на мельницах;
- кавитационный — КаВУТ (на основе технологии кавитационного приготовления);
- гидроударный — ЭКОВУТ (на основе классического мокрого измельчения).

Сейчас основные надежды на развитие использования ВУТ связаны с этим новым способом приготовления топлива — кавитационной технологией [21; 22]. В результате измельчения твердого компонента смеси (угля) на кавитационных мельницах суспензия приобретает новые свойства — стабильность на протяжении длительного времени и пластичность без каких-либо присадок.

На основе кавитационных процессов созданы аппараты для приготовления водомазутных эмульсий (содержание воды — до 10 %) с высокой степенью смешения. Диспергатор работает в режиме сверхзвукового истечения рабочей среды с наличием скачка уплотнений в зоне резонирования ультразвуковых колебаний. Под действием кавитационных и ультразвуковых процессов образуется мелкодисперсная, равномерно распределенная структура водяной фазы в виде сферических образований в среде топлива размером от 3 до 10 мкм. Разрушение взрывного характера сферической оболочки при вскипании воды приводит к дальнейшему рассредоточению воды. При такой высокодиспергированной гомогенной газо-паровоздушной смеси в результате термической диссоциации молекул водяно-



го пара образуются продукты, интенсифицирующие горение — водород, кислород, гидроксил ОН. Использование таких устройств для подготовки жидкого топлива к сжиганию на большом числе ТЭС показало значительное снижение выхода оксидов азота (до 40 %) при повышении КПД котла на 0,5–1,0 %. Такого значительного эколого-экономического эффекта не удавалось обеспечить при иных способах ввода влаги в топку.

Преимущество КаВУТ как экологически чистого топлива заключается в снижении токсичности во всех технологических операциях (приготовление, транспортирование, хранение, использование); снижении взрыво- и пожаро-опасности во всех технологических операциях; отсутствии опасности загрязнения воздуха, почвы и водоемов при хранении и транспортировании; снижении вредных выбросов в атмосферу при сжигании. Кавитационное водоугольное топливо характеризуется высоким уровнем локального динамического компрессионного и температурного воздействия на обрабатываемый материал (до 2000 °С и 25000 атм). В результате твердый компонент смеси (уголь) измельчается до заданной степени дисперсности, а суспензия приобретает новые свойства, выгодно отличающие ее от получаемой традиционным способом, в том числе:

- стабильность на протяжении длительного времени (контрольные образцы выдерживались около трех лет) и пластичность без каких-либо присадок при содержании твердого материала до 70 %;

- полностью высушенное или частично обезвоженное топливо переходит при добавлении воды в состояние устойчивой суспензии без механического воздействия;

- топливо не увеличивает объем при замерзании, а после размораживания восстанавливает свои исходные свойства;

## **4.9. Оптимизация размола твердого топлива по условиям воспламенения и выгорания**

---

В процессе развития технологии подготовки твердого топлива к сжиганию периодически обострялась проблема выбора оптимальной тонкости помола угольной пыли — загробление или утонение помола угля, — принимавшая конфликтный характер. Обсуждавшиеся технологические идеи различной направленности преследовали зачастую различные цели: повышение полноты выгорания топлив ухудшенного качества, сжигание смеси углей различного переменного со-

става, снижение вредных выбросов и затрат на пылеприготовление.

Для сложившейся на ТЭС технологии сжигания твердого топлива при определении оптимального качества помола, выбора оборудования для размола топлива руководствуются нормативными требованиями [23], учитывая качество топлива, режимы работы топки, состояние поверхностей нагрева, условия сжигания (структура факела, габариты и конфигурации топочной камеры). Важнейшим показателем качества исходного топлива при этом служит выход летучих, свидетельствующий о его химической активности. Размер угольных частиц поддерживается по остатку на сите  $R_{90}$  от 5 до 35 %. Выбору оптимальной тонины помола посвящен ряд исследований [24; 25].

Качество готовой угольной пыли, обеспечивающее эффективное ее сжигание, определяется рядом характеристик.

#### *Тонкость помола пыли*

Скорость горения всех видов твердого топлива примерно пропорциональна диаметру частицы. Этот показатель косвенным образом свидетельствует о поверхности контакта углеродной массы с окислителем. Оценивается тонкость помола по гранулометрическому составу ситовым анализом — остатку на ситах с различным размером ячеек (90, 200 микрон). С помощью сит возможно рассеивать только пыль с размером зерен более 40 мкм. Мелкие фракции легко цепляются за шероховатости материала сетки, механически соединяются друг с другом. Поэтому анализ фракционного состава мельчайшей пыли производят методом отвеивания на воздушном классификаторе либо с помощью современной техники — лазерным микроанализатором. Оба используемых сита с ячейками 90 и 200 микрон позволяют характеризовать основные условия их сжигания:

- остаток пыли на ситах с ячейками 90 мкм ( $R_{90}$ ) характеризует надежность воспламенения пыли, которую определяют наиболее мелкие частицы менее 90 мкм;
- остаток на сите 200 мкм ( $R_{200}$ ) характеризует полноту выгорания, которую определяют грубые фракции угля; эти частицы определяют потери тепла, связанные с механическим недожогом.

#### *Показатель полидисперсности*

Показатель полидисперсности  $n$  характеризует степень равномерности гранулометрического состава угольной пыли. Значение ее определяется способом размола (шаровая барабанная мельница (ШБМ), молотковая мельница (ММ), мельница-вентилятор (МВ), среднеходная мельница (СМ)) и учитывается при оценке оптимального помола угольной пыли (табл. 4.3).

Таблица 4.3

## Показатель полидисперсности углеродмольных мельниц

Тип мельницы	ШБМ	ММ	СМ	МВ
Значение коэффициента полидисперсности $n$	0,7–1,3	0,6–0,8	1,1–1,3	≈0,9

Для определения оптимальной тонкости помола угольной пыли значение  $R_{90}^{\text{опт}}$  для данного типа топлива, достаточное для надежного его воспламенения, вычисляют в зависимости от выхода летучих веществ  $V^{daf}$  и коэффициента полидисперсности  $n$ , обеспечиваемого данным размольным устройством, по эмпирической формуле:

$$R_{90}^{\text{опт}} = 4 + 0,8 \cdot n \cdot V^{daf}.$$

Определение оптимального помола угля не завершается его расчетной оценкой, которая носит предварительный характер. В рамках режимно-наладочных испытаний экспериментально оценивается эффективность топочного режима (включая экологические показатели, условия шлакования, экономические характеристики) для ряда значений  $R_{90}$  (рис. 4.14). По результатам этих испытаний определяется оптимальное эксплуатационное значение  $R_{90}$ , вносимое в режимную карту котла.

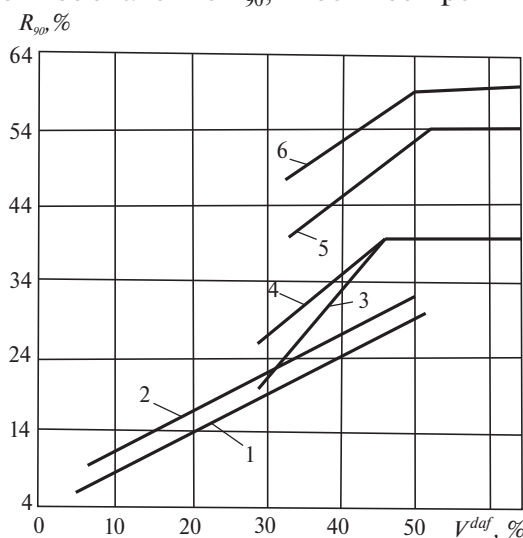


Рис. 4.14. Выбор тонкости помола угольной пыли в зависимости от выхода летучих для различных размольных устройств:

вид используемого угля (способ размола): 1 — АШ, полуантрациты, тощие и каменные угли (ШБМ); 2 — тощие и каменные угли (СМ); 3 — каменные угли (ММ); 4 — бурые угли (ШБМ); 5 — бурые угли (СМ); 6 — бурые угли (ММ и МВ)

### **4.9.1. Производство угольной пыли грубого помола. Переход к технологиям сжигания, адаптированным к угольной пыли грубого помола**

Сложность обеспечения надежной и безопасной эксплуатации пылесистем, громоздкость оборудования, высокие затраты энергии на пылеприготовление, влияние режима работы пылесистем на работу котла — все это неизбежно ставит вопрос о возможности исключения этого узла из технологической схемы угольной ТЭС. Возможная альтернатива снижения значимости пылесистем в работе ТЭС — отказ от сжигания пылевидного угля и возвращение к сжиганию кускового угля с размером до 25 мм.

В русле тенденций к переходу на сжигание крупноизмельченного угля появились:

- новые технологии факельного сжигания в вихревых топках (НТВ, ВИР-технологии) [26; 27];
- система факельного сжигания с нижним дутьем;
- технологии сжигания угля в стационарном кипящем слое;
- технология сжигания угля в циркулирующем кипящем слое.

Переход на угрубленный размол углей реализуется в отечественной практике, в частности в котлах с кипящим слоем, вихревых топках с низкотемпературным вихрем (НТВ), факельно-слоевых топках, факельных топках с дожигательной решеткой. Сжигание дробленки, пыли угрубленного размола в низкотемпературном вихре осуществляется на ряде ТЭЦ, использующих бурые ирша-бородинские угли, высоковлажный башкирский уголь, путем реконструкции существующих топочных устройств (котлы БКЗ-420, ПК-24, ТП-14). Такая технология сопряжена с рядом эксплуатационных проблем (износ экранов, повышенные ремонтные затраты).

### **4.9.2. Микропомол угольной пыли. Перспективы его применения в энергетике**

Принципиально новые возможности создает микропомол угольной пыли. С измельчением угля до 10–30 мкм (ультратонкая пыль) значительно возрастает количество отдельных пылевых частиц, пористость и величина удельной поверхности реагирования (поверхность частиц пыли по отношению к массе частицы) и интенсивность тепломассо-

обмена (обратно пропорциональная диаметру частицы). По данным источника [28] при использовании микропомола пылеугольный факел по своим размерам, теплонапряженности и интенсивности выгорания приближается к газовому или мазутному. В целом при горении в диффузионном режиме, характерном для факельного сжигания в пылеугольных топках, возможно 3–4-кратное ускорение процесса выгорания угольной частицы.

Использование микропомола пыли дает комплексный эффект:

- ограничение образования оксидов азота, включая быстрые оксиды, достигается снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на 25 %, в частности при подаче ультратонкой пыли в верхний ярус горелок при организации трехступенчатого сжигания угля;
- возможность замещения мазута в мощных энергоблоках, значительное снижение стоимости вырабатываемой энергии; затраты на переоборудование за счет разницы цен на мазут и уголь микропомола окупаются примерно за два года;
- возможность организации безмазутной растопки пылеугольных котлов;
- повышение эффективности топочного процесса за счет снижения необходимого избытка воздуха и снижения потерь тепла с уходящими газами;
- возможность прямого сжигания угля микропомола в камере сгорания ГТУ без его газификации, что открывает новые возможности создания угольных ПГУ;
- повышение эффективности ступенчатого сжигания (где затягивание воспламенения и выгорания на начальном участке факела необходимо компенсировать интенсификацией процесса на завершающем этапе топочного процесса, при завершении смесеобразования и догорания топлива), а также при организации трехступенчатого сжигания (для сокращения времени формирования восстановительной среды, процессов восстановления оксидов азота и последующего дожигания продуктов неполного горения из восстановительной зоны).

В России работы по этой технологии ведутся в Институте теплофизики СО РАН в Новосибирске. Созданы новые типы мельниц, позволяющих получать уголь с размером частиц 15–30 мкм при энергозатратах на помол, соизмеримых со стандартными в пылеугольных котлах системами ( $25 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$  угля). Одновременно разрабатываются техно-

логии и аппаратура получения и сжигания ультратонкой пыли в промышленных масштабах как перспективного способа решения экологических проблем.

Физико-химическая сущность поведения частиц ультратонкой пыли заключается в активации поверхности топливных частиц. С измельчением угля до 10–30 мкм осуществляется механическая активация угля, степень которой зависит от характера механического воздействия при размоле (истирающее, раздавливающее, ударное). В результате механической активации наряду с дроблением угля происходит фазовое преобразование с разрушением структур, образованием активных поверхностей, образование новых и раскрытие недоступных для воздействия пор, возникновение различных дефектов в структуре частицы, нарушающих межмолекулярное взаимодействие.

В целом при горении в диффузионном режиме, характерном для факельного сжигания в пылеугольных топках, возможно 3–4-кратное ускорение процесса выгорания угольной частицы. Микрпомол угольных частиц интенсифицирует процессы воспламенения и выгорания не только за счет резкого увеличения реагирующей поверхности (*диффузионный фактор*), но также за счет изменения реакционной активности поверхностных структурных фрагментов, образования свободных радикалов (*кинетический фактор*).

Если снижение зольности угля на 10 % снижает энергию активации угля, с 200 кДж/моль до 140 кДж/моль, то в результате микрпомола и соответствующей механоактивации поверхности угольной частицы эта величина падает до 60 кДж/моль.

Таким образом, активационное измельчение угля является одним из направлений облагораживания углей (от антрацитов с выходом летучих 4–6 % до бурых углей с выходом летучих 50 %).

#### **4.9.3. Оптимизация размера частиц угля по экологическим условиям**

Экспериментальные исследования показали, что сжигание более грубой угольной пыли определяет снижение концентрации оксидов азота в дымовых газах. Большинство промышленных измерений на котлах с прямоточно-вихревыми горелками подтверждают такой результат. При сжигании экибастузского угля в топке котла БКЗ-420–140–5 угрубление пыли снижает концентрацию окислов азота на 10 %. Еще более значительное влияние величины  $R_{90}$  отмечено при испыта-

нии котла ПК-39 на экибастузском угле. Установленный эффект может быть объяснен тем, что крупные, более инерционные пылевые частицы поступают в приосевую зону обратных токов, где концентрация кислорода значительно ниже, чем в аэросмеси. Скоростной прогрев угольных частиц в этой зоне сопровождается разрушением азотсодержащих соединений топлива и образованием молекулярного азота. Установленная зависимость не является универсальной; для прямоточных горелок, а также вихревых горелок с закруткой вторичного воздуха и аэросмеси влияние гранулометрического состава пыли на выбросы оксидов азота оказывается более значительным.

Качество размола топлива сказывается не только на образовании оксидов азота, но также на эффективности золоулавливания. В настоящее время сложились две противоположные крайние тенденции в технологии подготовки твердого топлива к сжиганию — получение ультратонкой угольной пыли и отказ от размола угля с сжиганием дробленки (в кипящем слое, в вихревых топках). Использование пыли утоненного размола и ультратонкой пыли (технология получения и сжигания которой освоена в зарубежной энергетике) ориентировано на создание безмазутных растопочных устройств, ограничение образования оксидов азота, включая быстрые оксиды. В существующих камерных топках влияние тонкости размола угля на экологические свойства котла неоднозначно (для различных горелочных устройств, различных топлив). При оптимизации размола необходимо учитывать комплекс факторов — условия выгорания, конверсии азота топлива, шлакования, золоулавливания.

Таким образом, экологическое совершенствование технологии сжигания угольной пыли развивается по различным направлениям — использование ультратонкой пыли и загрубление фракционного состава сжигаемого топлива вплоть до отказа от системы пылеприготовления. Соответственно в столь противоположенных направлениях развивается технология и оборудование для подготовки угля и сжиганию его.

---

## **4.10. Подготовка мазута к сжиганию**

---

За длительный период масштабного использования мазута в отечественной энергетике проведены работы по улучшению воспламенения и выгорания мазута, предупреждению коррозионной активности



продуктов сгорания. Созданные и использующиеся на практике технологические методы включают:

1) формирование однородной водомазутной эмульсии на основе кавитационной технологии с использованием подтоварной влаги, появляющейся в мазуте при добыче и хранении, содержание которой достигает 6–7 % от мазута. Наиболее эффективным способом нейтрализации негативного влияния влаги на топочный процесс является тонкая диспергация обводненного мазута [29];

2) подогрев мазута до 130–160 °С для придания топливу необходимой вязкости и улучшения распыла. Основными способами подогрева мазута являются подогрев погружными поверхностными паровыми подогревателями и подогрев в выносных трубчатых подогревателях;

3) очистка мазута от механических примесей для предупреждения забивания форсунок. После первичной грубой очистки мазута на сливных лотках организуется тонкая очистка сетчатыми фильтрами (64 отверстия на 1 см<sup>2</sup>) в мазутонасосной. Периодически сетка очищается обдувкой струями пара;

4) введение присадки для уменьшения коррозионной активности серосодержащих веществ. Активные соединения серы (сероводород H<sub>2</sub>S, меркаптан RSH), а также элементарная сера способствуют коррозии металлических резервуаров для хранения мазута и мазутопроводов не только в процессе прямого взаимодействия с металлическими стенкам. Установлено, что сульфиды, собирающиеся на дне резервуара, могут образовать гальванопару со сталью, возникающая при этом коррозия приводит к быстрому коррозионному разрушению днища резервуара, его нижнего пояса и мазутопроводов. Для предупреждения этих разрушительных процессов нижняя часть резервуара покрывается слоем цемента, асфальта. Для защиты верхней части резервуара применяется защитное покрытие из алюминия, цинка. Стальные емкости тщательно заземляются;

5) специфические присадки, улучшающие выгорание мазута, способствуют интенсификации воспламенения и равномерного выгорания капли мазута, которая состоит из смеси легко- и трудновоспламеняемой фаз. Присадки за счет микровзрывов приводят к разрушению капли, в том числе трудно сгораемых веществ. Количество присадки не превышает 0,1 % мазута по массе. Наиболее эффективно применение многофункциональных присадок, осуществляющих комплексно:

– защиту поверхностей нагрева от отложений и коррозии;

- более полное сгорание мазута;
- уменьшение вредных выбросов в атмосферу.

## **4.11. Преобразование угля с получением новых топливных продуктов — газификация и пиролиз**

Для энергетики газификация и пиролиз угля важны по следующим причинам:

- реализация технологических процессов энергопроизводства, где прямое использование угля невозможно,
- газотурбинные, парогазовые технологии;
- использование этих технологий в растопочных устройствах пылеугольных котлов [30; 31];
- возможность активации угольной пыли в процессе пиролиза [32];
- получение побочных товарных продуктов (жидких, газообразных).

### **4.11.1. Газификация угля как одно из направлений совершенствования угольной энергетики**

Газификация угля является одним из способов модификации твердого топлива путем конверсии его в газообразное состояние. Процесс газификации угля — это уже давно освоенная технология, она началась как метод производства бытового газа.

Крупным потребителем генераторного газа стали приводные стационарные и транспортные двигатели внутреннего сгорания, появившиеся в начале XX в. в США и Европе, работавшие первоначально исключительно на искусственном газовом топливе. Используя древесный уголь, кокс, антрацит, применяя прямой слоевой процесс (для двигателей — обращенный), получали в атмосферных (низконапорных) установках мощностью по топливу до 10–15 МВт (для обращенного процесса — до 1,5 МВт) сравнительно малосмольный газ (концентрация смол — менее 200 мг/м<sup>3</sup>), позволяющий использовать простую водяную систему газоочистки, приемлемую в то время. Максимальная производительность таких газификаторов не превосходила 12 тыс. м<sup>3</sup>/ч по энергетическому газу (с теплотой сгорания 4200–4600 кДж/м<sup>3</sup>) или 2 т у. т./ч.

Более длительный период генераторный газ использовали для отопления промышленных печей в машиностроительном, стекловаренном, кирпичном и др. производствах.

В Советском Союзе газификация твердых топлив получила значительное развитие в годы первых пятилеток, когда с началом создания промышленного сектора была поставлена задача замены привозных топлив местными видами твердого топлива. В тот период была освоена газификация подмосковных, челябинских и других бурых углей, антрацитов, торфа, горючих сланцев.

Станция торфяного генераторного газа на базе германских газогенераторов на Уралмашзаводе, работавшая с его основания до 50-х гг. XX в., обеспечивала работу мартеновских и металлургических печей одного из крупнейших в мире предприятий тяжелого машиностроения. Аналогичная станция угольного газа на тракторном заводе в г. Рубцовске обслуживала производство до 2006 г.

Один из ведущих центров по разработке и техническому сопровождению заводских газификаторов в России располагался в Екатеринбурге (Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники — ВНИИМТ, Восточный углехимический институт — ВУХИН, Уральский политехнический институт).

Обладая большой суммарной производительностью, заводские станции представляли набор маломощных (до 5 МВт по теплоте) и низкоэффективных ( $\eta_{\text{г}}^{\text{гФ}} \approx 0,5 - 0,6$ ) противоточных слоевых реакторов атмосферного типа, работающих на паровоздушном дутье с твердым (как правило) шлакоудалением.

Крупный прогресс в технологии газификации угля произошел с 1920 по 1950 гг. в связи с бурным развитием химических технологий получения на основе синтез-газа аммиака, метанола, водорода, синтетических моторных топлив и бытового городского газа. Под эти задачи были разработаны основные принципы современных технологий: применение кислорода, пылевидного и мелкозернистого топлива, высоких температур, давлений и непрерывного процесса.

Фундамент для современных производств газификации угля был заложен в Германии. В 1920–1940 гг. там была реализована беспрецедентная по масштабам программа углепереработки с производством моторных топлив, металлургического топлива, газов различного назначения и широкого спектра продуктов углехимии, включая пищевые продукты. Во время Второй мировой войны с использованием жидких продуктов пиролиза, прямого и непрямого ожижения угля производилось до 5,5 млн т/год моторного топлива. Были разработаны и про-

мышленно освоены три основных процесса, не утратившие актуальности и по сей день.

1. *Процесс Winkler* — газификация дробленого угля в кипящем слое при атмосферном давлении Фрица Винклера (*Fritz Winkler*). Первая промышленная установка создана в 1926 г. в Германии. Процесс был коммерциализирован компанией *Bamag GmbH* с участием *Rheinbraun AG*.

2. *Процесс Lurgi* — противоточная парокислородная газификация в стационарном слое кускового угля под давлением с сухим золоудалением. Разработана компанией *Lurgi AG*. Первая промышленная установка создана в 1938 г. в Германии.

3. *Процесс Koppers-Totzek* — газификация пылевидного угля в спутном потоке окислителя при атмосферном давлении с жидким шлакоудалением, разработанная Фридрихом Тотцеком (*Friedrich Totzek*, германский патент № 841482 от 30.04.1952) совместно с компанией Генриха Копперса (*Heinrich Koppers GmbH*, впоследствии — *Uhde*). Первая промышленная установка создана в 1950 г. в Финляндии.

В России после Второй мировой войны по технологии *Lurgi* были запущены два газовых завода — Щекинский, для обеспечения Москвы бытовым газом, и Ангарский завод оргсинтеза. В 50–60-е годы большое число коммерческих установок было закрыто, не выдержав конкуренции со стороны набирающего силу нефтегазового комплекса. В ряде регионов мира они еще продолжают действовать. Три газогенератора *Koppers-Totzek* работают с 1965 г. на отбросном газе нефтеперерабатывающего завода в Египте на станции аммиака.

Ни одна из установок второго поколения, разработанных для специфических производственных условий, не отвечала большинству требований к «энергетическим» газификаторам.

Начиная с 70-х гг. XX в., когда первый нефтяной кризис вернул интерес мирового энергетического сообщества к угольному топливу, наиболее крупные энергомашиностроительные компании при поддержке правительств начали разработку технологий двойного назначения (энергетика и промышленность). За основу были приняты базовые работы по направлениям:

1. Интенсификация тепломассообменных процессов — увеличение единичной производительности и энергетической эффективности реактора, снижение удельных капитальных и эксплуатационных затрат.

2. Улучшение экологических характеристик.

3. Большая гибкость и универсальность использования различных топлив.

4. Повышение надежности и долговечности, оснащение современными методами контроля и мониторинга.

В результате нескольких десятилетий упорных трудов был создан ряд перспективных технологий, отработанных на полномасштабных демонстрационных объектах, главные из которых:

1. *Процесс высокотемпературной газификации Винклера (НТВ)* — низкотемпературная двухстадийная газификация кислородом и воздухом в циркулирующем кипящем слое под давлением (с рециркуляцией летучей золы и угольной пыли). Отработана на лигните компаниями *Uhde* и *Reihnbrawn* на газовом заводе г. Берренрат (Германия) в 1956—1969 гг. Демонстрационная установка производительностью 33 т/ч эксплуатировалась на заводе в период с 1986 по 1997 гг. Коммерческая реализация планировалась в проекте *KoBRA* (Германия), который не был осуществлен.

2. *Процесс British Gas/Lurgi (BGL)* слоевой высокотемпературной кислородной газификации под давлением с системой жидкого шлакоудаления в процессе *Lurgi*. Демонстрационная установка производительностью 20 т/ч создана в Вестфилде (Великобритания) в 70-х гг. XX в. В промышленном масштабе технология реализована на газогенераторе, эксплуатировавшемся на газовом заводе *Schwarze Pumpe* (Германия). Разрабатываются проекты с газификаторами *BGL* для США, Китая, Индии, Монголии.

3. *Процесс Texaco* кислородной газификации водонефтяной эмульсии (исходный вариант), а в дальнейшем, при использовании в энергетических приложениях, — малозольной водоугольной суспензии (ВУС) под давлением в нисходящем потоке с жидким шлакоудалением и водяным охлаждением газа. Демонстрационная установка на ВУС производительностью 6 т/ч была создана в Германии в начале 80-х гг. XX в. ПГУ с газификаторами по технологии *Texaco GP* (сейчас *GE*) в США: *Cool Water*, *Polk* и *Edwardsport*.

4. *Процесс Prenflo* высокотемпературной кислородной газификации пылевидного угля в восходящем потоке под давлением с жидким шлакоудалением, разработан компанией *Uhde* (ранее *Krupp-Koppers*). Промышленный газификатор *Prenflo* производительностью 108 т/ч (порядка 700 МВт) действует в единственном экземпляре в составе ПГУ *Puertollano* (Испания). Развитие процесса *Prenflo* вновь возобновлено

в 2009 г. в направлении повышения надежности газоохлаждения за счет перехода от встроенного теплообменника к водяному квенчингу.

5. *Процесс Shell (Shell Coal Gasification Process)* высокотемпературной кислородной газификации пылевидного угля в восходящем потоке под давлением с жидким шлакоудалением — совместная разработка компании *Uhde* и *Shell*. Демонстрационная установка 7 т/ч создана в Гамбурге (Германия) в 80-х гг. Первая ПГУ с этим газификатором — ПГУ *Buggenum* (Нидерланды).

6. *Процесс GSP (менерь Siemens)* — высокотемпературная кислородная газификация угольной пыли в нисходящем потоке под давлением для работы на топливах со сложной минеральной частью (засоленные угли). Первый поточный газификатор под маркой *Siemens* работает на ПГУ г. Вресова (Чешская республика) с 2007 г. на смолах *Lurgi*.

Основные показатели базовых технологий газификации третьего поколения приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

#### Типичные показатели базовых технологий газификации третьего поколения

Процесс	<i>Texaco (GE)</i>	<i>BGL</i>	<i>GSP (Siemens)</i>	<i>HTW</i>	<i>Shell</i>	<i>Prenflo</i>
Год появления	1973	1974	1975	1978	1986	1988
Технология	поточная	плотный слой	поточная	кипящий слой	поточная	поточная
Топливо	ВУС	Уголь	Лигнит, смолы	Лигнит, биомасса	Уголь	Уголь
Давление, МПа	3,5–8,7	3,0–6,0	1,0–5,0	1,0 и 2,5	3,0	2,5
Единичная мощность, МВт	45–440	130–450	100–500	195–220	50–490	700
Температура в зоне газификации, °С	1300–1400	1600–1700	1800–2000	950–1100	1400–1600	2020
Температура на выходе из реактора, °С	1100–1200	550–650	1400–1600	950	1200–1300	1650
Расход угля на 1 м <sup>3</sup> сухого газа, кг	0,6	0,8	0,6	0,67	0,4	0,6
Теплота сгорания синтез-газа, МДж/м <sup>3</sup>	8,7	12,7	9,9	8,6	10,9	10,0

Окончание табл. 4.4

Процесс	<i>Texaco</i> (GE)	<i>BGL</i>	<i>GSP</i> (Siemens)	<i>HTW</i>	<i>Shell</i>	<i>Prenflo</i>
Концентрация генераторных смол, г/м <sup>3</sup>	~ 0	~ 0,5–3	~ 0	~ 1–3	~ 0	~ 0
КПД <sub>хим</sub> , %	75–77	80	77	84	80–82	81
КПД <sub>энерг</sub> , %	80	92	79	80	90	95

В пошедших в коммерческие проекты установках третьего поколения был завершен переход на малые частицы, повышенное давление, кислородное дутье, высокие температуры и жидкое шлакоудаление. Общая тенденция — увеличение надежности, эффективности и единичной производительности. Повышение давления увеличивает интенсивность и является одним из способов совершенствования базовых процессов газификации. Работа установок на кислороде позволяет избегать балластирования газа азотом и создавать чистые угольные технологии с газификацией (и полным сжиганием) и удалением CO<sub>2</sub> по способам *pre*- или *post-combustion* с высокотемпературной паровой турбиной на водороде.

#### 4.11.2. Пиролиз угля в энергетике

##### *Характеристика процесса пиролиза угля*

Пиролиз представляет собой термическое разложение углеродной массы под действием высоких температур (до 950–1050 °С) в бескислородной среде. Температурный режим пиролиза — от низкотемпературного (550 °С) до высокотемпературного (950–1000 °С) — соответствует различному выходу продуктов пиролиза — кокс, пиролизный газ, смолы. Там, где задачей является максимальный выход газа, используется высокотемпературный пиролиз угля.

Термическое разложение угля (в условиях нагрева без доступа воздуха) начинается при температуре от 170 до 400 °С для химически молодых топлив, ~400 °С для тощих углей и антрацита, завершается пиролиз при 1100–1200 °С. В этом процессе выделяются летучие, влага, образуется коксовый остаток. Основные стадии процесса термического разложения угля:



- до 550 °С — полукоксование, на этой стадии происходит практически полное выделение смолистых веществ и других конденсируемых продуктов;
- 550–800 °С — среднетемпературное полукоксование, это основной диапазон образования углеводородных газов и водорода;
- 800–1100 °С — высокотемпературное коксование, на этой стадии происходит выделение горючих газов, состоящих преимущественно из метана и водорода.

Термическое разложение углей протекает по разному в зависимости от природы угля — степени метаморфизма (каменные, бурые угли), состава, а также параметров процесса — температуры, давления, состава среды в зоне термического разложения, времени пребывания в среде, интенсивности прогрева частиц топлива. В отличие от процессов газификации, которые производятся под давлением, пиролиз эффективно осуществляется и при атмосферном давлении.

### *Продукты пиролиза*

К настоящему времени отсутствует теоретическое обоснование расчетной оценки состава и качества продуктов пиролиза на основании химического и петрографического состава угля, его структуры. Поэтому ход процесса пиролиза конкретного угля и конечный состав продуктов пиролиза изучаются экспериментально.

*Летучие вещества* представляют наиболее ценную часть угля. В состав летучих веществ входят:

- газообразные продукты;
- жидкие продукты (в парообразном состоянии) или первичная смола;
- пирогенетическая влага (продукты разложения угольной массы).

Соотношение продуктов термического разложения при разных температурах спекающегося каменного угля, по данным Н. В. Лаврова, приведено в табл. 4.5.

Таблица 4.5

**Характеристика основных стадий пиролиза**

Параметры процесса	Полукок- сование	Среднетем- пературное коксование	Высокотемпе- ратурное коксо- вание
Выход твердого остатка, % от угля	80–82	75–77	70–72
Температура воспламенения, °С	450	490	700
Выход газа, нм <sup>3</sup> на т угля	120	200	320
Теплота сгорания газа, МДж/нм <sup>3</sup>	31	25,1	18,9
Выход, в % от массы угля смолы легких масел	9–10 1,0	6–7 1,0	3,5–1,0 —

*Полукок* является высокореакционным топливом, несмотря на пониженное содержание в нем остаточных летучих веществ. При термохимической обработке угольных частиц (650–800 °С) путем нагрева без доступа воздуха происходит насыщение поверхности угольной пыли активными частицами, радикалами и повышение реакционной способности угольной пыли. Механизм этого процесса исследован в работах Сибирского отделения Академии наук России. В результате установлено, что полукок обладает высокой реакционной способностью. Температура воспламенения — от 150–180 до 200–270 °С. Здесь же были получены данные по некоторым физическим свойствам продуктов пиролиза каменного угля: средняя теплоемкость горючей массы сухого угля — 1,03 кДж/(кг · °С), теплоемкость золы — 0,71 кДж/(кг · °С), плотность газа — 1,0–1,2 кг/м<sup>3</sup>.

УралОРГРЭС проводил опытное сжигание партии полукокса бурого угля в топке котла, оборудованного для сжигания кузнецкого каменного угля, при этом не выявлено специфических проблем организации рабочего процесса. Практически способ термической предварительной подготовки угольной пыли путем

пиролиза реализован на котле паропроизводительностью 420 т/ч с помощью узлов термообработки, встроенных в основные пылеугольные горелки (разработка УралОРГРЭС). Этот процесс обеспечивает снижение выбросов оксидов азота при работе на кузнецких углях до уровня, отмечаемого в режиме сжигания газа, кроме того, повышается стабильность топочного процесса при изменении в широком диапазоне качества угля (выход летучих от 9 до 30 %). Опытное сжигание полукокса канско-ачинского угля в топке котла БКЗ-420–140 Красноярской ТЭЦ-1 подтвердило преимущества продуктов термопереработки по сравнению с исходным углем [33; 34]. Таким образом, полукокс (бурых, каменных углей) является универсальным высокореакционным твердым топливом. Следует учитывать определенные условия открытого хранения полукокса, при котором возможно насыщение этого топлива влагой, сорбирование кислорода, азота воздуха и, в конечном счете, ухудшение его теплотехнических качеств (при длительном хранении).

*Пиролизный газ*, выделяющийся при полукоксовании в диапазоне температур от 500 до 1000 °С, включает горючие компоненты (в основном водород и метан).

С ростом температуры процесса пиролиза увеличивается доля потенциальной теплоты угля, переводимой в пиролизный газ, однако при этом снижается удельная теплота сгорания газа и возрастает его объем. Это осложняет задачи компремирования газа выше давления циклового воздуха за компрессором ГТУ и подачи его в камеру сгорания ГТУ, поскольку при этом увеличиваются затраты энергии на сжатие, возникают проблемы с организацией сжигания забалластированного низкокалорийного газа. Выход пиролизного газа зависит, практически пропорционально, от выхода летучих. Выход пиролизного газа и состав продуктов пиролиза также в значительной мере зависит от скорости прогрева угольной частицы.

*Смоли и легкие масла*, содержащиеся в летучих, представляют собой сложную смесь органических соединений. Они уносят от 3 до 7 % потенциальной теплоты угля, что сокращает долю теплоты, передаваемую в газотурбинный цикл. С увеличением тем-

пературы процесса выход смолы уменьшается до 3 % по массе от исходного сухого угля, а плотность увеличивается. Разложение смолы сопровождается образованием горючего газа и смоляного кокса, обогащением пиролизного газа водородом. Состав и свойства смол зависят в большой мере от исходного топлива.

### *Технологические схемы и аппараты пиролиза угля*

В общем случае технологическая схема пиролиза угля включает узлы для реализации следующих основных этапов:

- получение теплоносителя;
- нагрев угля до температуры рабочего процесса;
- дегазация угольных частиц;
- разделение газовой, жидкой и твердой фазы.

Для нагрева угольной пыли в процессе полукоксования используется:

- нагрев через стенку (мощные коксовые батареи регенеративного типа, рекуператорные реторты);
- контактный нагрев твердым рециркулирующим теплоносителем (установка ЭНИН);
- контактный нагрев высокотемпературным газовым теплоносителем с забалластированием угольного (пиролизного) газа (схема использована УралОРГРЭС во встроенных устройствах подогрева угольной пыли котла ТП-87).

С учетом динамики процесса энергопроизводства в УралОРГРЭС разрабатываются **технология пиролиза в потоке газового теплоносителя** и поточные аппараты высокоскоростного пиролиза. Пиролизер выполняет комплекс функций: производство греющей газовой среды, смешение ее с пылевым потоком, высокоскоростной нагрев до рабочей температуры, дегазация угольных частиц при вихревом движении по корпусу, разделение газопаровой и пылевой фаз, отдельный вывод их из корпуса. Он выполняется в виде вертикального цилиндрического канала с тангенциальным вводом потока пыли с греющей средой (пар или продукты сжигания вспомогательного топлива) с разделителем сред на выходе.

Расчетная характеристика высокоскоростного и высокотемпературного процесса пиролиза (900 °С) с контактным подогре-

вом газовым теплоносителем для бурого угля ( $Q_i^r = 15$  МДж/кг,  $W^r = 33,0\%$ ,  $A^r = 12\%$ ,  $V^r = 43\%$ ) приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6

**Характеристика высокоскоростного  
и высокотемпературного процесса пиролиза**

Параметр	Значение
Горючая (беззольная сухая) масса угля, %	55,0
Плотность пиролизного газа, кг/м <sup>3</sup>	0,64
Массовый выход летучих, кг/кг исходного угля	0,234
Массовая доля отдельных компонентов в общем выходе летучих, %	
• пиролизный газ	0,686
• смола и легкие масла, пирогенетическая влага	0,073
Массовый выход пиролизного газа, кг/кг исходного угля	0,16
Плотность пиролизного газа, кг/нм <sup>3</sup>	0,437
Объемный выход пиролизного газа, нм <sup>3</sup> /кг исходного угля	0,368
Выход полукокса, кг/кг исходного топлива	0,436
Удельная теплота сгорания продуктов пиролиза	
• пиролизный газ, МДж/нм <sup>3</sup>	17,6
• смола и легкие масла, МДж/кг	37,7
• полукокс, МДж/кг	17,8
Доля потенциальной тепловой энергии исходного топлива, переходящей к продуктам пиролиза	
• пиролизный газ	0,393
• смола и легкие масла	0,093
• полукокс	0,514
Доля пиролизного газа, используемая для подогрева исходного топлива до температуры процесса (900 °С), %	8,51
Удельная теплота сгорания пиролизного газа, забалластированного продуктами сгорания части его в процессе подогрева исходного угля, МДж/нм <sup>3</sup>	13,1
Выход сухого забалластированного пиролизного газа, поступающего к газовой турбине, нм <sup>3</sup> /кг исходного угля	452,9

Пиролизер может функционировать при атмосферном давлении (при этом ввод горючего пиролизного газа в камеру сгорания ГТУ осуществляется дожимным компрессором), либо при давлении, близком к расчетному давлению в газотурбинном цикле (с использованием пневмо- либо камерного насоса для ввода угольной пыли в рабочую зону пиролизера). Время пребывания в зоне смешения, прогрева и дегазации не превышает 1,0–1,5 с. Поскольку большая часть соединений серы переходит в процессе пиролиза в газообразные продукты термообработки (в виде сероводорода), объем которых на два порядка меньше объема топочных газов при сжигании соответствующего количества угля, организуется мало-затратная сероочистка пиролизного газа (рис. 4.14).

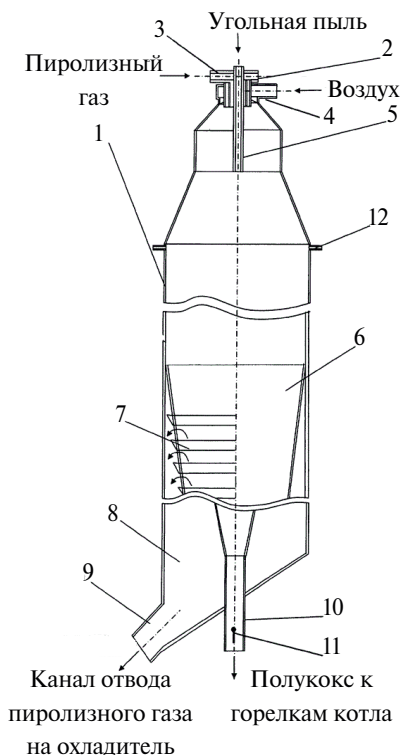


Рис. 4.14. Схема пиролизера для пылевидного угля:

- 1 — корпус; 2 — горелка; 3 — патрубок вспомогательного топлива; 4 — патрубок подвода воздуха; 5 — патрубок подвода высококонцентрированной аэроосеси;  
 6 — сепаратор; 7 — жалюзийные каналы; 8 — газосборная камера;  
 9 — газоотводящий патрубок; 10 — патрубок отвода готового твердого продукта;  
 11 — регулятор уровня; 12 — сопла

Таким образом:

- процессы газификации в составе технологии ПГУ достаточно изучены, технология их отработана в различных вариантах, создана соответствующая аппаратура. Это определяет широкое практическое использование газификации в цикле ПГУ в зарубежной энергетике;
- процессы пиролиза угля изучены, технология их отработана в различных вариантах, однако практического использования в энергетике не получила. Выявленные особенности процесса, актуальные для интеграции пиролиза в ПГУ-технологии, позволяют оценивать конкурентоспособность ее с технологиями полной газификации угля.

---

## Литература к разделу 4

---

1. Качественные характеристики угольного топлива их влияние на технико-экономические показатели ТЭС/Р. Е. Алешинский [и др.] // Энергетик. 2003. № 1.
2. Алехнович А. Н., Богомолов В. В., Артемьева Н. В. Реакционные свойства энергетических углей // Горение твердого топлива : сб. докладов VII Всероссийской конференции. Новосибирск, 2009. Ч. 3.
3. Белосельский Б. С. Технология топлива и энергетических масел. М. : Изд. МЭИ, 2003.
4. Шульман В. Л. Оценка экологических качеств энергетического топлива // Теплоэнергетика. 2001. № 5.
5. Демкин В. В. Усреднение и смешение углей // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях : сб. трудов. Красноярск, 2000.
6. Назмеев Н. Г., Мингалеева Г. Р. Системы топливоподачи и пылеприготовления : справочное пособие. М., 2005.
7. Померанцев В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива. М. ; Л. : Машгиз, 1948.
8. Михайлов Н. М. Вопросы сушки топлива на электростанциях. М. ; Л. : Машгиз, 1957.
9. Маслов В. Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. М. : Энергия, 1977.



10. Чуханов З. Ф. Основы теории термической переработки топлива. М. : Известия АН СССР, ОТН, 1954. № 8.
11. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М. : Изд-во АН СССР, 1968.
12. Бабий В. И., Алавердов А. И., Барбараш В. М. Влияние предварительного подогрева угольной пыли на выход топливных оксидов азота // Теплоэнергетика. 1983. № 9.
13. Лавров Н. В., Розенфельд Э. И., Хаустович Г. П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. М. : Энергия, 1981.
14. Линдквист Б. Л. Огневая подготовка топлива с низкой реакционной способностью газовым теплоносителем // Теплоэнергетика. 1971. № 1.
15. Шульман В. Л., Страхов В. А., Шурпа Б. Л. Разработка и внедрение системы предварительного подогрева угольной пыли // Электрические станции/ 1995. № 2.
16. Шульман В. Л. Предварительная термическая подготовка топлива как реальный способ технологического и экологического совершенствования пылеугольных котлов // Электрические станции. 2000. № 6.
17. Альтшулер В. С. Новые процессы газификации твердого топлива. М. : Энергия, 1976.
18. Газификация твердого топлива для энергетических установок. М. : НИИЭнформэнергомаш, 1983. Вып. 3.
19. Газогенераторные технологии в энергетике / А. В. Зайцев [и др.]. Екатеринбург, 2010.
20. Пронин М. С. Энергоэффективное и экологически безопасное использование канско-ачинских углей в энергетике. Институт СибВТИ Красноярского филиала.
21. О применении водомазутной эмульсии для сжигания в котельных установках/Б. Б. Булгаков [и др.] // Энергетическое строительство. 1995. № 6.
22. Мосин С. И., Морозов А. Г., Делягин Г. Н. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. 2008. № 9.
23. Нормы расчеты и проектирования пылеприготовительных установок ; под ред. М. Л. Кисельгоф, Н. В. Соколов. М., Л. : Госэнергоиздат, 1958. 158 с.

24. Толчинский Е. Н., Лаврентьев А. Ю. Выбор тонкости помола угольной пыли // Электрические станции. 2002. № 12.
25. Об оптимальной тонкости помола экибастузского угля / А. Г. Иванов [и др.] // Электрические станции. 1970. № 4.
26. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220–100/К. А. Григорьев [и др.] // Энергетик, 2009. № 1.
27. Применение ВИР-технологии для обеспечения надежности сжигания березовского угля в котельных установках / Ф. З. Финкер [и др.] // Эксплуатация и модернизация энергоблоков мощностью 800 МВт : сб. трудов. Шарыпово, 2002. С. 53–59.
28. Исследование горения механоактивированных углей микропомола / А. П. Бурдуков [и др.] // Горение твердого топлива : сб. VI Всероссийской конференции. Новосибирск, 2009. Ч. II.
29. О применении водомазутной эмульсии для сжигания в котельных установках / Б. Б. Булгаков [и др.] // Энергетическое строительство. 1995. № 6.
30. Внедрение системы термической подготовки углей для организации муфельной растопки и подсветки факела топочных камер котлов на современных ТЭС / В. А. Дубровский [и др.] // Электрические станции. 2007. № 8.
31. Вальцев Н. В., Берг Б. В., Арасланов А. Р. Снижение расхода мазута и природного газа на растопку пылеугольных котлов // Актуальные проблемы энергетики : сб. научных трудов. Екатеринбург, 2007.
32. Ван Хек К. Г. Пиролиз как ключевой процесс преобразования угля // Глюкауф, 1988. № 4/5.
33. Глубокая термоподготовка угольной пыли — путь уменьшения шлакования и улучшения экологических характеристик паровых котлов / С. Деринг [и др.] // Энергетик. 1994. № 1.
34. Блохин А. И., Кенеман Ф. Е., Стельмах Г. П. Угольные мини-ТЭС с внутренним пиролизом угля // Электрические станции. 2005. № 7.

---

## 5. ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ — НАПРАВЛЕННОЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

---

### 5.1. Основные параметры топочного процесса

---

**П**ри организации топочного процесса рассматриваются следующие основные параметры, определяющие условия выгорания топливо-воздушной смеси:

- *аэродинамическая структура* потоков в топочной камере: прямоточный, криволинейный потоки, система локальных вихрей, единый вихревой горизонтальный (спиральный) или вертикальный вихревой поток топочных газов, рассредоточенный ввод газозвоздушных потоков по высоте топки, нижнее дутье;
- *характер пребывания* топлива в реакционной зоне: неподвижное положение частицы топлива в плотном слое на неподвижной решетке, движение в плотном слое вместе с подвижной решеткой, циркуляция в кипящем слое, циркуляция в слое с последующим выходом в надслоевое пространство и возвратом недогоревших частиц в слой, перемещение в топочном объеме вместе с воздухом и топоч-

ными газами, возможность сепарации топливных частиц в вихревых зонах;

- *время пребывания* угольных частиц в зоне горения как условие полноты выгорания; это обстоятельство необходимо, в частности, учитывать при особых условиях сжигания полидисперсной угольной пыли, когда каждой фракции свойственно различное время выгорания;

- *температура в зоне пребывания топлива*, низкотемпературный либо высокотемпературный топочный процесс — на участке начального воспламенения, в зоне догорания и до выхода из топки как важное условие воспламенения, выгорания, шлакования;

- *динамика смешения* топлива с окислителем в топочной камере — как фактор интенсивности тепловыделения и распределения его по высоте топочной камеры, условий образования оксидов азота, продуктов неполного горения.

Эти факторы являются инструментом направленного воздействия на характер и качество топочного процесса, конструкцию топочно-горелочного устройства.

## **5.2. Условия пребывания топлива в реакционной зоне в различных технологиях сжигания топлива**

---

### **5.2.1. Сжигание топлива в плотном слое**

Сжигание в **плотном фильтрующем слое** кускового топлива угля, торфа, а также дров осуществляется на плоской колосниковой решетке, куда на горящий раскаленный слой топлива забрасывается свежее топливо. За счет фильтрации воздуха, нагреваемого в нижних участках слоя, осуществляется последовательно нагрев частиц топлива, удаление влаги, выделение летучих вследствие распада термонеустойчивых органических соединений, изменение структуры коксового остатка с увеличением пористости частиц, вынос летучих из слоя и выгорание их в надслоевом объеме топочной камеры, выгорание углеродной массы. Реализуется двойная схема зажигания топлива — нижнее зажигание топлива, подаваемого на горящий слой за счет потока горящих продуктов сгорания нижележащей коксовой массы, и верхнее зажигание за счет лучистого теплообмена между слоем топлива и зоной пламенного горения [1]. При слоевом сжигании (как и всех прочих

способах сжигания — факельном, вихревом) осуществляется двухступенчатое сжигание с разделением потока воздуха, подаваемого на полное сгорание топлива. Выделяется первичный воздух ( $\alpha = 0,25-0,6$ ), вводимый в топку вместе с топливом, и вторичный воздух, обеспечивающий выгорание летучих и коксового остатка.

Слой до определенной (критической) скорости фильтрации дутьевого воздуха сохраняет устойчивость, нарастает вынос наиболее мелких частиц угля, увеличивается порозность слоя (объем пустот между частицами угля). Дальнейшее увеличение скорости воздуха может привести к переходу к кипящему слою.

Важным этапом в развитии технологии слоевого сжигания явилось создание предтопок с наклонными решетками для сжигания высоковлажных топлив, в частности топки Макарьева, Померанцева [2]. Эта технология позволила организовать сжигание кускового топлива (торфа) в крупных котлах ТЭС.

### **5.2.2. Регулирование времени пребывания топливных частиц в реакционной зоне для кипящего слоя**

При вводе угольных частиц в кипящий слой происходит их беспорядочное движение над решеткой, возвратно-поступательное движение вверх и вниз. Быстрый разогрев за счет теплообмена с примыкающими частицами слоя и последующего воспламенения при контакте с окислителем приводит к тому, что процесс горения по высоте протекает практически при постоянной температуре. Сжигание в кипящем слое отличается неоднородным режимом псевдоожижения — наличием пузырькового механизма фильтрации воздуха через слой материала. Пузырьковый, или кипящий, слой формируется при относительно низкой скорости фильтрации воздуха с образованием газовых пузырей, обеспечивающей четко фиксируемую поверхность кипящего слоя при малом выносе зернистого материала. Существенным условием эффективности процесса горения в слое является интенсивный межфазный массообмен, определяющий скорость подвода окислителя в зону горения. Межфазный теплообмен в слое между частицами и газом осуществляется в основном за счет перемещений частиц в горизонтальном и вертикальном направлениях. Побудителем перемещений частиц является движение газовых пузырей [3]. Размещение в слое трубных пучков ухудшает перемешивание материала. Структура кипящего слоя характеризуется наличием по высоте слоя трех зон, отличающихся механизмом переноса массы частиц и теплоты.

В топочных устройствах кипящий слой образуется мелкозернистым инертным материалом (кварцевый песок, шамотная крошка, угольная зола) и угольными частицами.

Для кипящего слоя характерны следующие параметры:

- скорость воздуха — 0,5–4 м/с;
- размер частиц топлива — 3–10 мм;
- высота слоя не более — 0,3–0,5 м;
- тепловое напряжение объема топки  $Q_V = 3,0–3,5 \text{ МВт/м}^3$ ;
- концентрация топлива в слое не превышает 5 %.

В кипящем слое возможно сжигать любое топливо — твердое, жидкое, газообразное, горючие отходы. Негорючий наполнитель в кипящем слое может быть активным по отношению к вредным газам, образующимся при горении. Введение наполнителя (известняка, извести или доломита) дает возможность перевести в твердое состояние до 95 % сернистого газа.

Положительные качества технологии кипящего слоя давали основания для проведения комплекса научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по созданию энергетических парогенераторов с кипящим слоем. Однако задача эта не была решена. Головной котел производительностью по пару 420 т/ч, изготовленный Барнаульским котлостроительным заводом, оказался неработоспособным. Эта задача была успешно решена при переходе на циркулирующий кипящий слой (ЦКС). В настоящее время за рубежом в эксплуатации находится обширный парк котлов с ЦКС, при этом в качестве топлива используются в основном горючие отходы, нестандартное, низкокачественное топливо.

### **5.2.3. Изменение условий пребывания топлива в реакционной зоне в ходе развития топочных факельных процессов сжиганием**

Технология факельного сжигания с самого своего зарождения находится в непрерывном совершенствовании соответственно новым задачам, в новых условиях. Наиболее активно происходила трансформация топочного процесса и топочных устройств применительно к свойствам топлива. На всем пути развития российской энергетики топочные технологии адаптировались к специфическим свойствам необогащенных низкокачественных энергетических топлив — высоковлажных, тощих, высокосольных, с легкоплавкой золой. Находимые адекватные конструктивные решения топочной камеры, горелочных

устройств, систем подготовки топлива к сжиганию постоянно совершенствовались. К настоящему времени считаются освоенными угли с влажностью до 50 %, зольностью до 50 %, удельной теплотой сгорания до 5900 кДж/кг.

Развитие топочно-горелочных устройств энергетических котлов при факельном сжигании шло в направлении интенсификации смесеобразования и улучшения выгорания топливо-воздушной смеси за счет турбулизации потоков реагентов — топлива и воздуха. На смену прямоточным горелочным устройствам, реализуемым в шахтно-мельничной топке, пришли вихревые пылеугольные и газомазутные горелки. Улучшение стабилизации, интенсификация смесеобразования, сокращение протяженности факела, высокая степень регулируемости вихревого факела определили широкое использование вихревых горелок и вихревых топочных устройств большой и малой мощности.

В ходе развития факельных процессов осуществлялось решение текущих актуальных проблем отечественной энергетики — формирование полидисперсного пылеугольного факела, сжигание низкорекционных, высоковлажных, высокозольных и непроектных топлив. Решение таких разнородных проблем проходило не только при проектировании электростанций и котельного оборудования, но также и на действующих электростанциях путем реконструкции существующего оборудования.

#### **5.2.4. Регулирование времени пребывания полидисперсной угольной пыли в реакционной зоне при факельном сжигании**

Важнейшей задачей в организации пылеугольного факела являлась выработка и реализация основных принципов организации полидисперсного угольного факела:

- в полидисперсном потоке пылеугольной взвеси частицы угля движутся вместе с транспортирующим газовым потоком, относительная скорость обтекания их невелика;
- в полидисперсном факеле горение частиц осуществляется во взаимодействии со смежными частицами.

Условия воспламенения и выгорания отдельных крупных и средних частиц могут существенно отличаться в силу различия размера частиц, локального избытка воздуха, концентрации угольной пыли:

- мелкие частицы выгорают вместе с летучими в начальном участке факела, горение оставшихся, более крупных частиц смещает-



ся в зону, обедненную кислородом, забалластированную продуктами горения мелких частиц;

- по сечению факела и в топочной камере могут складываться зоны с недостатком окислителя, с пониженной температурой, что приведет к затыгиванию горения поступивших сюда частиц угля, коксового остатка;

- ухудшение условий выгорания таких частиц связано также с рассредоточением их в потоке, нарушением взаимодействия между ними в поддержании горения.

Нарушение изложенных условий горения угольных частиц в полидисперсном факеле приводит к формированию механического недожога, требуется увеличение времени пребывания угольных частиц в реакционной зоне — в высокотемпературном объеме топочной камеры в расчете на самые «неблагополучные» частицы угля.

Эта задача последовательно решалась различными путями.

1. При наличии *прямоточного восходящего потока* топочных газов, в который вовлекаются факела отдельных горелок (прямоточных, вихревых), для увеличения времени пребывания частиц в благоприятных для выгорания условиях в топке возможно в некоторых пределах предусматривать *увеличение высоты топочной камеры*. Однако возможности снижения механического недожога ограничены. По оценке, приведенной в источнике [4], для двукратного уменьшения недожога время, отводимое для выгорания угольной частицы, должно быть увеличено в полтора раза, соответственно, для прямоточного восходящего потока топочных газов должна возрасти и высота зоны активного горения в топке. В отраслевых методических документах [5] предусматривается оценка необходимой высоты топочной камеры по условиям выгорания наиболее крупных частиц полидисперсного факела малореакционных углей при оптимальных режимных факторах (температура воздуха, избыток воздуха, доля первичного воздуха, скоростной режим горелки, эффективная рециркуляция топочных газов к корню факела).

2. Существенное *увеличение протяженности траектории угольных пылевых частиц* в топке и, соответственно, времени пребывания их в зоне выгорания достигается при организации аэродинамической структуры потока топочных газов в *виде горизонтального вихря, восходящего по спирали*. Вся масса топлива участвует в таком движении, в том числе и часть его, завершившая выгорание в начальном участке факела. Такая структура реализуется в тангенциальных топочных

устройствах многих котлов за рубежом и в отечественной энергетике.

3. *Дифференцированное воздействие на время пребывания* в зоне горения пылеугольных частиц, различных по начальной крупности и по потере массы в ходе выгорания, осуществляется при организации вихревого потока топочных газов в вертикальной плоскости. Впервые такая схема реализована в топке А. А. Шершнева (1927 г.), затем развита в топке В. В. Померанцева и Н. В. Голованова (рис. 5.1). Здесь осуществляется *многократная циркуляция несгоревших частиц в стабильном вертикальном вихре* и вынос в верхнюю часть топки мелких частиц топлива. Такая схема реализуется в котлах с циркулирующим кипящим слоем, где рециркуляция крупных недогоревших частиц осуществляется по большому контуру «кипящий слой — надслоевое пространство топочной камеры — циклон — возврат в слой».

В работах В. В. Померанцева, С. Л. Шагаловой, Б. Д. Кацнельсона, на основе исследований и расчетов прямооточного полифракционного факела, обоснована целесообразность создания в топочной камере двух зон горения — *отдельно для крупных и мелких частиц* [6; 7; 8]. Исходя из этой технологической установки разработан ряд эффективных конструкций.

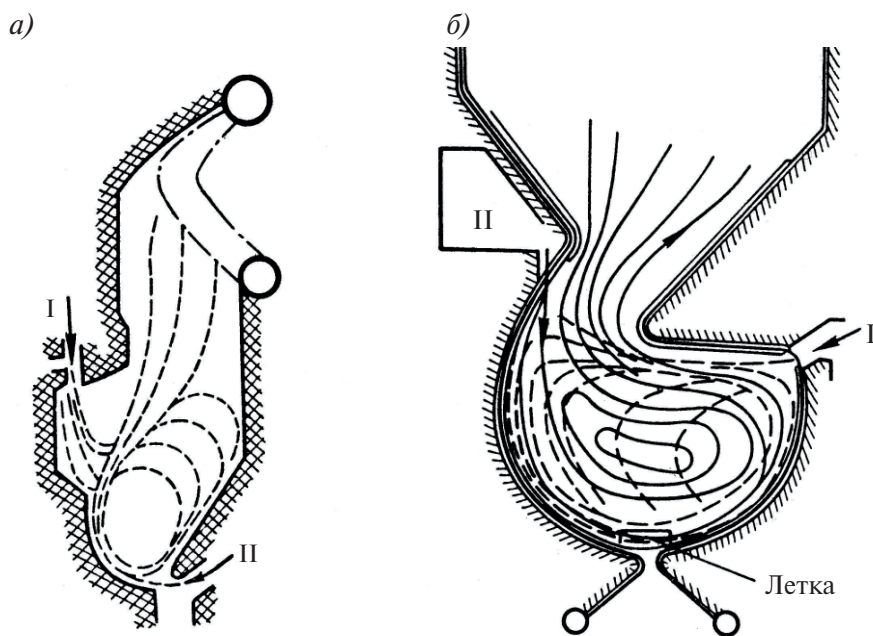


Рис. 5.1. Схемы топков:

а) топка А. А. Шершнева; б) топка с многократной циркуляцией частиц топлива;  
I — первичный воздух, II — вторичный воздух

### 5.2.5. Аэродинамические методы регулирования пребывания топлива в реакционной зоне

Одной из активно внедряемых отечественных технологических разработок по сжиганию твердого топлива является система вихревого двухзонного сжигания полидисперсного топлива — так называемый низкотемпературный вихрь (НТВ) (рис. 5.2, 5.3) [9]. Аэродинамическая структура потока в вихревой зоне по технологии НТВ создается за счет взаимодействия двух организованных потоков: первый поток сформирован из топливно-воздушной смеси, поступающей в топку через горелки; второй поток состоит из горячего воздуха, подаваемого в топку через систему нижнего дутья. Потоки направлены навстречу друг другу и образуют пару сил, создающую вихревое движение в нижней части топки. В область активного горения вовлекается значительно больший объем топки, при этом формируется тепловая и температурная неравномерность, складывается высокотемпературное ядро в зоне воспламенения. С наклонном горелок формируется вихревая структура потока в нижней части топки, куда направляется значительная масса топлива. В ней преобладают наиболее крупные фракции, которые при развороте струи сепарируются из потока. Они вовлекаются нижним дутьем в многократную циркуляцию и сгорают в этой зоне. Этот процесс настолько активен, что допускает подачу топлива угрубленного помола. Верхняя часть топки работает в режиме дожигания с форсированной подачей воздуха, с избытками больше стехиометрических значений.

В НТВ-топке организуются две зоны активного горения, которые разнесены по ее высоте: вихревая и прямоточная. Основным отличительным признаком НТВ-технологии, определяющим эффективность сжигания низкорекреационного топлива, является наличие «активной» вихревой зоны в нижнем объеме топки, куда поступают и где многократно циркулируют наиболее грубые частицы угольной пыли, и прямоточной зоны с  $S$ -образным основным потоком, обеспечивающим отделение грубых частиц при развороте потока и вынос наиболее мелких фракций по восходящей траектории.

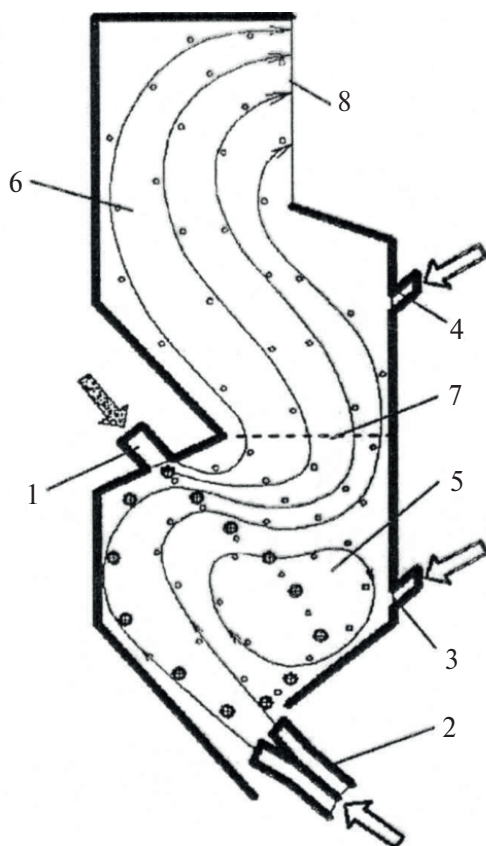


Рис. 5.2. Структура потоков в топке с низкотемпературным вихрем (НТВ):

1 — пылеугольная горелка; 2 — система нижнего дутья; 3 — нижний ярус третичного дутья; 4 — верхний ярус третичного дутья; 5 — вихревая область факела; 6 — прямоточная область факела; 7 — плоскость раздела вихревой и прямоточной областей факела; 8 — выходное окно топки

Вихревая зона занимает объем нижней части топки от устья холодной воронки до горелок. Здесь осуществляется полное выгорание наиболее крупных фракций топлива (до 20 % всего тепловыделения в топке) за счет увеличения времени пребывания в реакционной зоне. Зона горения основного потока пыли по криволинейной траектории располагается над вихревой зоной в верхней части топки.

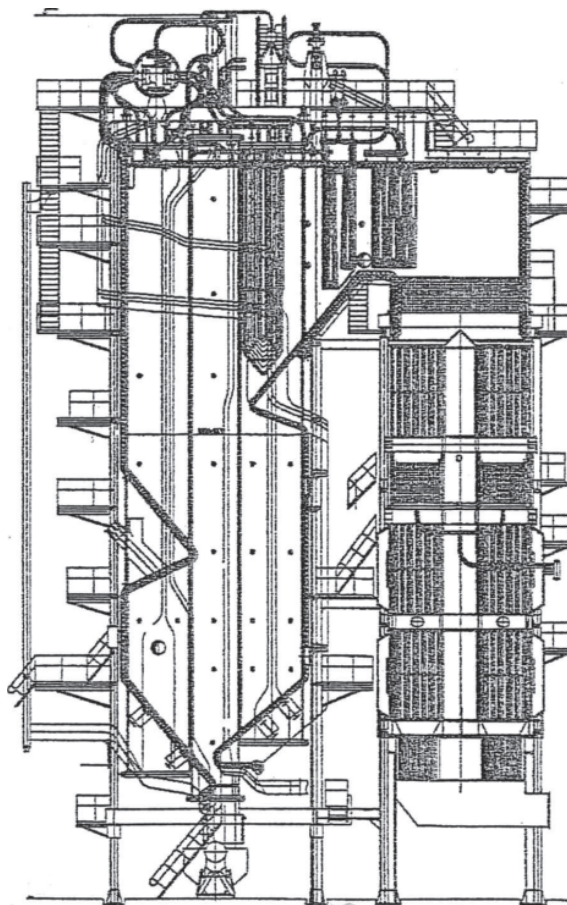


Рис. 5.3. Общий вид котла БКЗ-220–9,8–510 с НТВ-топкой для сжигания бурого угля

Если сопоставить такую организацию топочного процесса с типовым традиционным факелом, можно констатировать, что характерное линейное прямоточное движение топочных газов с горизонтальной установкой горелок создаст преимущества для выгорания мелких фракций, крупные выгорают на последующем участке топки при низких температурах и малых остаточных концентрациях кислорода.

Наряду с технологией НТВ ведутся работы по дальнейшему освоению вихревого метода сжигания. В отличие от НТВ в системе ВИР-технологии (рис. 5.4, 5.5) используется комплекс технических решений [10], эффект достигается совмещением ряда известных способов в организации низкоэмиссионного факела:

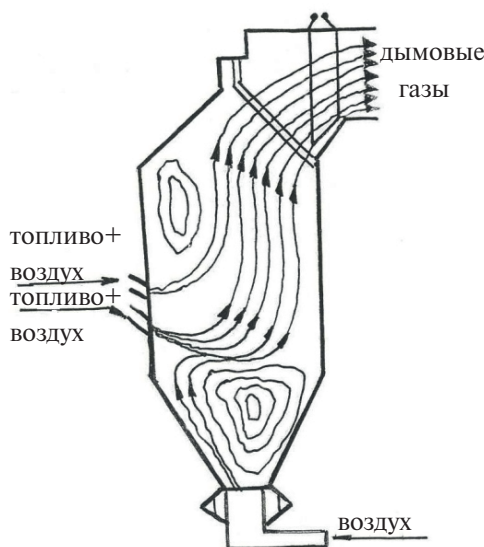


Рис. 5.4. Структура потоков в топке по ВИР-технологии

- низкие избытки воздуха в горелках;
- сброс части воздуха в надфакельное пространство;
- установка дожигательных горелок над основным горелочным поясом;
- организация различных зон активного горения для мелких частиц (в прямооточном факеле) и крупных частиц (в вихревой зоне с многократной циркуляцией);
- многоярусное расположение горелок, которые различным образом ориентированы: верхний ярус — горизонтальное положение осей, нижние горелки отклонены вниз.

Здесь присутствуют элементы технологии трехступенчатого сжигания, конструкции малотоксичных горелок, системы двухзонного сжигания. На котле с ВИР-технологией при снижении качества топлива (удельной теплоты сгорания менее 9200 кДж/кг) максимальная нагрузка котла без подсветки факела мазутом ограничена 160–180 т/ч. В усовершенствованном варианте вихревой топки добавлен третий горелочный поток, расположенный над наклоненным вниз. Он выполняет роль дожигательного воздуха, чему способствует подача в верхний ярус горелок тонкодисперсного топлива и избыточного воздуха.



Верхние горелки работают с избытками воздуха больше стехиометрических значений. В наклоненный горелочный поток подают топливо грубого помола в бесепараторном режиме при недостатке воздуха.

При низкоэмиссионной аэродинамике в нижней части топки образуются обширные зоны с недостатком кислорода ( $\alpha < 1$ ) и повышенной концентрацией рециркулирующих частиц топлива. Большая концентрация кокса в вихревой зоне приводит к изменению эмиссионных характеристик факела.

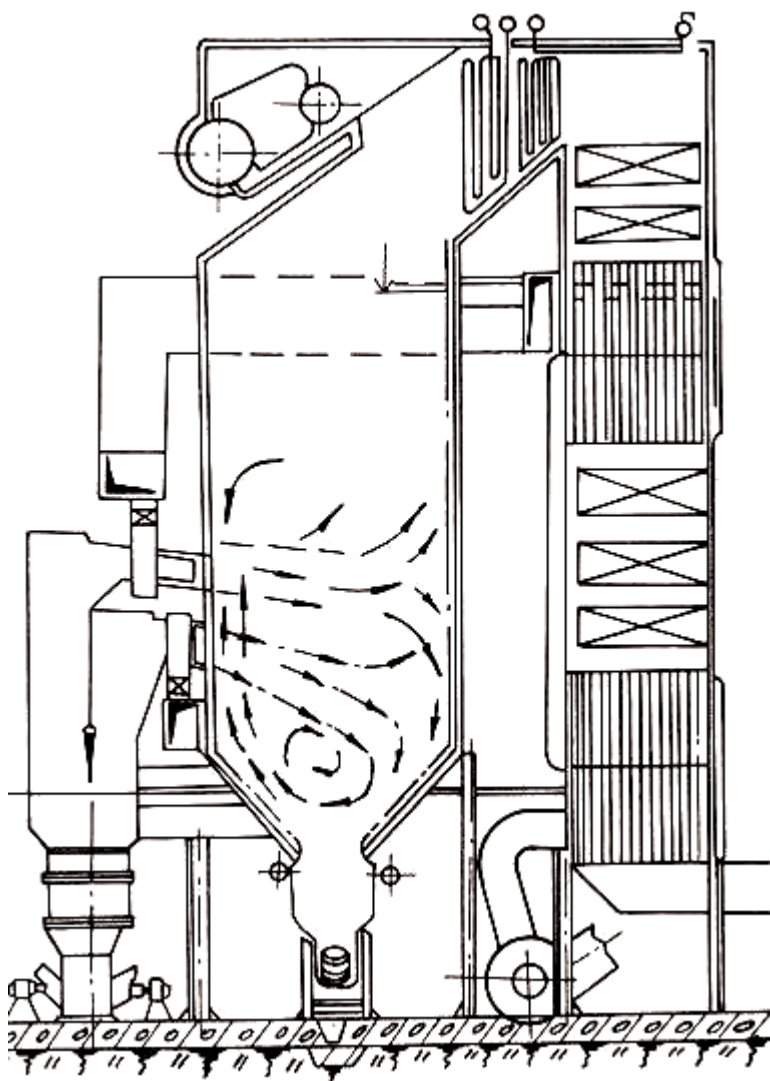


Рис. 5.5. Схема факельно-вихревой топки котла ПК-10



Наличие значительной массы горячих частиц кокса, циркулирующих в вихревой зоне топки и имеющих сплошной спектр излучения, а также повышенная концентрация трех- и четырехатомных газов приводят к повышению излучательной способности факела. К тому же вся поверхность топочной воронки интенсивно воспринимает тепловое излучение. Поэтому, несмотря на снижение средней температуры факела, лучистое тепловосприятие топочных поверхностей нагрева возрастает. Кроме того, повышенные скорости газов вблизи стен топки увеличивают конвективную составляющую теплообмена. В результате максимальные температуры в топке снижаются на 100–200 °С, а на выходе из нее — на 80–150 °С. Подача воздуха в нижние горелки в количестве 30–50 % от общего приводит к снижению выхода «топливных» оксидов азота. Именно в этой зоне повышенной концентрации горящего кокса и инертных газов происходит реакция восстановления оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), образовавшихся на начальном участке факела. Редукция NO происходит как в газовой фазе, так и при химической сорбции NO на поверхности кокса.

Опыт успешного внедрения ВИР-технологии ограничен.

### **5.3. Формирование температурного режима в топке как фактора эффективности топочного процесса. Технологии высокотемпературного и низкотемпературного сжигания**

---

В развитии технологий сжигания твердых топлив в энергетических топочных устройствах сложились встречные тенденции — создание эффективных схем *высокотемпературного сжигания* и организация *низкотемпературного сжигания* угля. По этим направлениям в зарубежной и отечественной энергетике активно ведутся научно-технические исследования, инженерно-конструкторские разработки, имеется опыт практической реализации отдельных решений на электростанциях. Оба указанных направления по существу имеют одни и те же конечные цели: повышение эффективности сжигания низкокачественных, шлакующих топлив, адаптация котельного оборудования к условиям нестабильности качества топлива, использование низкокачественных углей, а также решение экологических проблем. Специфичность способов достиже-

ния и степень реализации целей в каждом случае определяет для конкретных условий приоритетность той или иной технологии.

*Высокотемпературные топочные процессы* реализуются различными путями:

- разделение камеры горения (зона начальной газификации, воспламенения и выгорания угольных частиц) и зоны дожигания, охлаждения продуктов сгорания; здесь высокотемпературный этап сжигания угля локализуется в ограниченном объеме с температурой 1750–1800 °С, вне обширной теплообменной зоны, вне контакта с поверхностями нагрева рабочей среды; такова схема организации процесса в полуоткрытой топке для сжигания низкорекреационных топлив, организации жидкого шлакоудаления с переводом основной части минеральной массы угля (до 90 %) в шлак;
- сжигание топлива в предвключенных высокотемпературных аппаратах — в циклонных камерах, в слое (устройства горнового типа), в расплаве;
- ограничение теплоотвода от факела в начальном его участке (зажигательный пояс, футеровка экранов в горелочном поясе и нижней части топки);
- использование обогащения кислородом воздушного дутья;
- высокотемпературный воздухоподогреватель.

Известные разработки систем высокотемпературного сжигания предусматривают помимо конструктивных решений, указанных выше, также определенные режимные мероприятия по поддержанию необходимого температурного уровня в топке:

- минимальный избыток воздуха в высокотемпературной зоне сжигания топлива;
- максимальный подогрев дутьевого воздуха.

При высокотемпературном топочном процессе осуществляется ряд мероприятий по повышению его экологических и технологических возможностей — ввод присадок для направленного регулирования состава шлака с приданием ему необходимых потребительских качеств, высокотемпературный подогрев циклового воздуха — рабочего тела газовой турбины с внешним сжиганием.

*В схемах низкотемпературного сжигания* низкокачественного топлива эффективность выгорания при ограниченных габаритах топочной камеры достигается различными технологическими и техническими решениями:

- включение в теплообменные процессы в топочной камере слабо используемых экранных поверхностей (нижняя радиационная часть (НРЧ), холодная воронка) путем изменения аэродинамики факела и топочных газов;

- увеличение времени пребывания топливных частиц в реакционной зоне за счет многократной их циркуляции по замкнутому контуру в топке при переходе от прямоточной аэродинамической структуры потока топочных газов к системе вихрей с восходящим движением выгорающих частиц;

- сниженный температурный уровень процесса обеспечивается присутствием в топке с кипящим и циркулирующим кипящим слоем большой массы инертной мелкозернистой среды.

Однако рассматриваемые технологии не всегда являются антагонистами. Практика показала, что для каждой из них существует определенный круг проблем, решаемых с наибольшим эффектом. К настоящему времени в решении проблемы сжигания трудновоспламеняемых низкорекреационных, тощих углей задействованы следующие основные методы создания оптимального температурного режима:

- формирование *высокотемпературной* топочной среды в зоне воспламенения, охватывающей значительную часть объема топочной камеры;

- длительное пребывание топлива в *низкотемпературной* зоне прогрева и выгорания в слое мелкозернистого материала с умеренной температурой при многократной циркуляции топливных частиц;

- обеспечение *максимальной локальной температуры* в зоне воспламенения на начальном участке пылеугольного факела путем интенсивной рециркуляции топочных газов к корню факела, повышения температуры горячего воздуха и подсветки пылевого факела высококалорийным топливом.

Вместе с тем на различных этапах развития нашей энергетики изменялись (с учетом изменения качества топлива) приоритеты в оценке оптимального температурного уровня топочных процессов. Так, недооценка в настоящее время значимости технологии сжигания топлива с жидким шлакоудалением является следствием недальновидности и узко ориентированного подхода. Уже и сейчас понятно, что полувековой опыт разработки, освоения и эксплуатации котлов с жидким шлакоудалением представляет огромную ценность и неизбежно будет востребован и впредь. Технологию сжигания твердого топлива с жидким шлакоудалением не следует рассматривать как пройденный этап развития топоч-

ной технологии. Технология высокотемпературного сжигания, ориентированная на новое поколение энергооборудования ТЭС, позволяет:

- более полно решать экологические проблемы ТЭС (сокращение выбросов золовых частиц, возможность полной утилизации золошлаковых отходов, отказ от сооружения золоотвалов);
- создавать новые сферы использования угля в энергопроизводстве: в ГТУ с внутрицикловой газификацией, ГТУ с внешним сжиганием;
- вовлекать в топливный баланс ТЭС горючие промышленные и бытовые отходы без выбросов высокотоксичных хлорорганических соединений — диоксинов, фуранов, разрушаемых при температуре выше 1450 °С.

При оценке перспектив развития высокотемпературной и низкотемпературной технологий сжигания топлива в энергетике важен комплексный подход. Рассмотрев сущность двух антагонистических (на первый взгляд) технологий топливосжигания (высокотемпературные и низкотемпературные процессы), приступим к анализу практического опыта и путей дальнейшей интеграции этих технологий в энергопроизводство.

## **5.4. Высокотемпературный режим сжигания низкорекреационных углей**

---

### **5.4.1. Топочные камеры с жидким шлакоудалением**

Одним из значительных импульсов к развитию высокотемпературных топочных устройств с жидким шлакоудалением (ЖШУ) послужили проблемы сжигания низкорекреационных углей, топлива переменного качества. Помимо этого, интерес представляли способы преодоления затруднений при транспортировке и хранении летучей золы высокозольных топлив — значительно меньший объем шлака (на 30 %), отсутствие пыления гранулята позволяют решать эти проблемы при организации ЖШУ.

Организация высокотемпературного топочного процесса в камерной топке с жидким шлакоудалением предусматривает выделение в топке двух зон:

- зоны активного горения и плавления;
- зоны охлаждения топочных газов.

Наличие ошипованных и футерованных экранов в зоне активного горения в котлах с ЖШУ снижает теплоотвод и повышает температуру в нижней части топочной камеры. Это стабилизирует процесс воспла-

менения и улучшает горение малореакционных углей типа АШ. Именно поэтому в 60-е и 70-е гг. XX в. практически все отечественные котлы, рассчитанные на сжигание антрацита, полуантрацита и тощих углей, были оборудованы топками с ЖШУ [11; 12].

В нашей стране было налажено широкомасштабное производство котлов с ЖШУ. Наряду с разработкой и производством топочных устройств с ЖШУ в начале 60-х гг. ряд действующих котлов (ТП-80, ПК-38) был переоборудован на ЖШУ, что позволило устранить шлакование экранных и конвективных поверхностей нагрева, обеспечить повышение паропроизводительности до номинального значения. В энергетике к 1990 г. более 40 % всех энергоблоков мощностью 300 МВт и выше были оснащены котлами с ЖШУ. В 50-х гг. началось внедрение циклонных топок как модификации топочных устройств с ЖШУ, что явилось качественно новым этапом в развитии топочной техники. Здесь был достигнут коэффициент шлакоулавливания 80 %.

Первые котельные агрегаты, предназначенные для пылеугольного сжигания канско-ачинских углей, были оборудованы в основном шахтно-мельничными топками с твердым шлакоудалением при воздушной сушке угля в молотковых мельницах (ТПК-1, ПК-10Ш Красноярской ТЭЦ-1, ПК-38 Назаровской ГРЭС, Красноярской ГРЭС-2). Основным недостатком этих котлов являлось интенсивное шлакование топочных экранов, обусловленное относительно высокой температурой в ядре горения (1350–1440 °С) и на выходе из токи (1100 °С — температура, превышающая начало шлакования для канско-ачинских углей,  $\theta_{н.шл.} = 950\text{--}1100\text{ °С}$ ).

Реконструкция котельных агрегатов ПК-38 Назаровской ГРЭС с переводом на жидкое шлакоудаление лишь частично решила проблему шлакования (экранов топки). Однако из-за высокой температуры газов на выходе из топочной камеры здесь сложились ограничения по длительной бесшлаковочной нагрузке ( $\leq 250\text{ т/ч}$ ). Накопленный в стране опыт проектирования, наладки, эксплуатации таких котлов показывает успешное решение технологических проблем: предотвращение шлакования экранных поверхностей нагрева, надежная эвакуация расплавленного шлака, перевод в расплав значительного количества минеральной части топлива (до 40 %), обеспечение минимальных потерь с механическим недожогом.

Эффективна организация топочного процесса в топке с жидким шлакоудалением котлов БКЗ-320—140 П и БКЗ-420—140 ПТ, оборудованных двумя вихревыми горизонтальными предтопками с пережимом топоч-

ной камеры, отделяющим эти предтопки от камеры охлаждения. Благодаря более высокой температуре в предтопках и вихревой аэродинамике, способствующей осаждению в шлак легкоплавких компонентов золы и связыванию свободной окиси кальция, котлы обеспечивают надежное сжигание канско-ачинских углей при более высокой температуре газов на выходе из топки ( $\theta'_{\text{т}} = 1200^{\circ}\text{C}$ ), чем для котлов с твердым шлакоудалением. Они получили значительное распространение на ТЭС, сжигающих канско-ачинские угли. Вместе с тем, наряду с явными преимуществами (меньшие габариты и металлоемкость, достаточно высокий КПД 92,5–93 %), этим котлам свойственны такие недостатки, как невозможность сжигания углей с высокими плавкостными характеристиками золы (бородинский уголь с  $A^d > 12\%$ ), отмечаются большие выбросы оксидов азота и серы, чем у топок с твердым шлакоудалением.

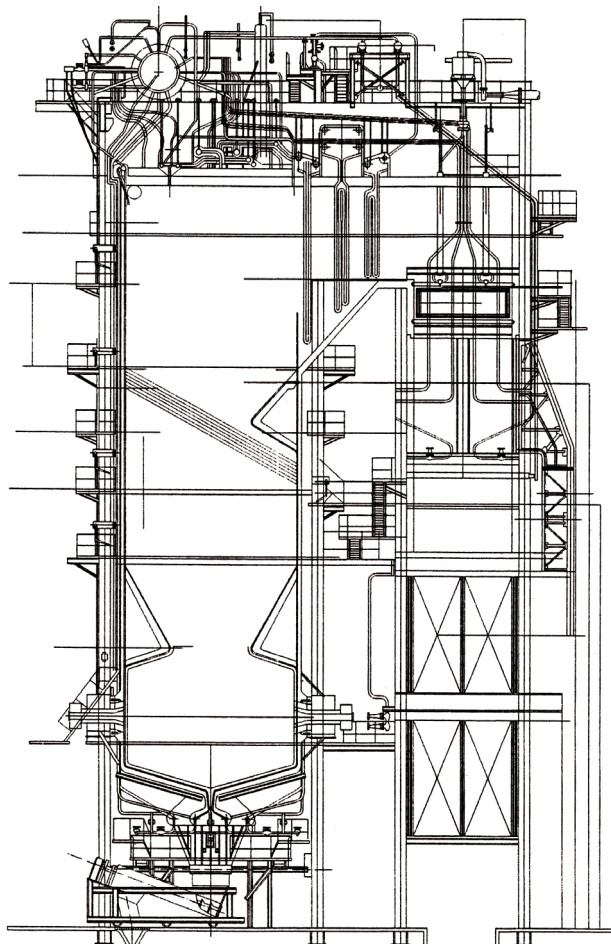


Рис. 5.6 Конструктивная схема котла ТП-87 с жидким шлакоудалением



В настоящее время в эксплуатации на ряде ТЭС находятся котлы ТП-87 с жидким шлакоудалением, использующие кузнецкий уголь СС (рис. 5.6). Они оборудованы полуоткрытой топкой с пережимом. Выступы, образованные задним и фронтным экранами НРЧ, создают пережим, разделяющий топку на две камеры: камера горения (предтопок) и камера охлаждения топочных газов. Экраны топки в камере горения полностью ошипованы и покрыты огнеупорной массой. Тепловое напряжение камеры горения при номинальной нагрузке составляет  $0,173 \text{ МВт/м}^3$ . На стенках камеры горения встречно расположены 12 горелок в один ярус. В ходе эксплуатации котлов с жидким шлакоудалением приходилось неоднократно (по мере изменения качества топлива) возвращаться к важной практической задаче стабилизации процесса эвакуации расплава из топки. Эвакуация жидкого шлака улучшалась за счет роста температуры в надподовом пространстве, который был достигнут:

- снижением избытка воздуха в горелках;
- установкой надподовых горелок.

#### **5.4.2. Условия сжигания низкорекреационных углей в высокотемпературной топке с жидким шлакоудалением**

К наименее реакционным топливам, используемым в российской энергетике, относится антрацитовый штыб — АШ, он содержит большое количество мелочи (менее 6 мм). Отличается предельно низким выходом летучих (3–6 %), что определяет низкую реакционную способность, низкие показатели воспламеняемости. Одновременно для АШ характерна легкоплавкость золы. Эти два качества требуют взаимоисключающих условий сжигания — высокую температуру топочного процесса для надежного воспламенения углеродной массы (она воспламеняется при температуре свыше  $700^\circ\text{C}$ ) и одновременно минимальную температуру в топке по условиям шлакования [13].

Известный знаток истории нашей энергетики Ю. Н. Флаксерман воспроизвел все этапы последовательного освоения сжигания АШ (Штеровская ГРЭС, Зуевская ГРЭС, Мироновская ГРЭС) [14]:

- организация сжигания пылевидного АШ для устойчивого сжигания его в топках крупных котлов;
- транспорт пыли в горелки горячим воздухом, сброс сушильного агента в топку через специальные сбросные сопла над горелочным поясом;



- полное экранирование стенок топочной камеры водоохлаждаемыми трубами для устранения шлакования при сжигании АШ;
- развитие зажигательного пояса на всю высоту нижней части топки.

Реализация комплекса мероприятий позволила перейти в режим жидкого шлакоудаления. В итоге оформились оптимальные режимные условия сжигания АШ [15]:

- тонкий размол угольной пыли  $R_{90} \sim 60\%$ ;
- транспортировка пыли к горелкам горячим воздухом;
- высокая температура аэросмеси;
- высокий уровень температуры в топке.

В современных топочных устройствах набор соответствующих технологических решений существенно расширен:

- при прямом вдувании аэросмеси в горелки (без промбункера пыли) предусматривается установка на входе в горелки пылеконцентрактора для отвода части транспортирующего увлажненного воздуха из потока аэросмеси; в результате снижения доли первичного воздуха повышается температура факела;
- интенсифицируется циркуляция высокотемпературных топочных газов к устью горелки выполнением соответствующей конфигурации топки — например, плечевой конструкции; в такой топке обеспечивается общий мощный возвратный поток топочных газов к горелкам, в то время как горелки осуществляют индивидуальные рециркуляционные потоки тепловой мощности;
- предварительный подогрев угольной пыли перед вводом в топку.

Опыт организации топочного процесса с жидким шлакоудалением, отраженный в руководящих указаниях «Проектирование топок с жидким шлакоудалением» [16], также определяет необходимость вместо одностороннего воздействия осуществления комплексного решения всех основных проблем, возникающих в топках с жидким шлакоудалением, использованием различных методов воздействия на топочные процессы:

- стабильная эвакуация жидкого шлака при нагрузке в диапазоне от номинальной до 60–70 % от номинальной;
- плотность футеровки;
- экономичная работа котлоагрегата — высокая полнота выгорания топлива в указанном диапазоне;
- предотвращение высокотемпературной коррозии экранов; для чего исключить образование восстановительной среды в пристенной зоне топочной камеры, обеспечив наличие здесь окислительной среды;

— соответствие экологическим нормативам по воздействию на окружающую среду.

### 5.4.3. Ограничение выбросов загрязнителей при сжигании топлива в топках с жидким шлакоудалением

Высокий уровень концентрации оксидов азота в дымовых газах не является неизбежным следствием использования данной технологии сжигания угля. Необходимо преодолеть представления о неизбежности повышенных выбросов оксидов азота в топках с жидким шлакоудалением, которые базируются на устаревших представлениях о возможностях экологического совершенствования топочного процесса. Экологическое совершенствование существующих топок с ЖШУ в части ограничения выбросов оксидов азота осуществляется по следующим направлениям:

— предотвращение образования «топливных» оксидов азота, в частности за счет предварительной термообработки угольной пыли (нагрев до 650–750 °С в отсутствие окислителя) с переводом азота топлива в молекулярный азот. Выход оксидов азота при этом совпадает с данными для режима работы котла на природном газе, что свидетельствует о практически полном исключении выхода топливных оксидов;

— устранение технологически неоправданного превышения максимальной температуры факела относительно  $t_{\text{нж}}$ . В тех котлах, где имеется значительный разрыв между  $t_{\text{факела}}$  и  $t_{\text{нж}}$ , есть возможность снижения выхода оксидов азота охлаждением факела;

— интеграция в организацию топочного процесса эффективных технологических методов подавления воздушных оксидов азота, не связанных со снижением температуры в надподовом пространстве: трехступенчатое сжигание, селективное некаталитическое восстановление оксидов азота (СНКВ) [17].

При переводе котла ТП-87 с ЖШУ (кузнецкий уголь СС) на сжигание высококонцентрированной аэросмеси содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах снизилось с 1900 до 1200 мг/нм<sup>3</sup>, при последующем внедрении системы предварительного подогрева угольной пыли содержание  $\text{NO}_x$  не превышало 800 мг/нм<sup>3</sup>, при работе на природном газе этот показатель составлял 750 мг/нм<sup>3</sup>. Как отмечено в работе [12], накопленный опыт в эксплуатации высокотемпературных топок с жидким шлакоудалением не убеждает в целесообразности массового перевода уже

работающих котлов с жидкого на твердое шлакоудаление по технологическим и экологическим соображениям.

#### 5.4.4. Использование циклонных предтопок для высокотемпературного сжигания малореакционных углей

Циклонная организация топочного процесса была предложена Г. Ф. Кнорре в тридцатые годы прошлого века. Циклонный метод сжигания характеризуется газификацией основной массы топлива в периферийной зоне циклонной камеры с последующим сгоранием продуктов газификации и недогоревшего кокса в условиях интенсивного смесеобразования в высокотемпературном центральном потоке. В 60–70 гг. прошлого века большие научные и инженерные силы, производственные мощности были вовлечены в разработку теоретических, технологических, конструкторских решений для создания циклонных топочных устройств [18; 19]. Огромный объем исследовательских работ привел к созданию уникального по глубине и охвату научного задела в этой сфере и разработке энергетических котлов нового типа.

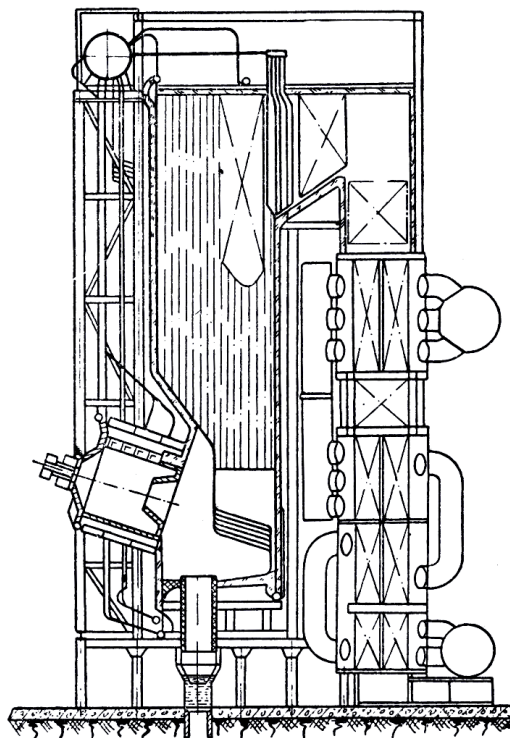


Рис. 5.7. Котел БКЗ-170 с горизонтальным циклонным предтопком

Опытное сжигание назаровского угля проводилось на котле Барнаульского котельного завода с параметрами пара  $p = 7$  МПа,  $t = 570$  °С, паропроизводительностью 170 т/ч. Топочное устройство котла состоит из двух циклонных предтопок, камеры дожигания и камеры охлаждения (рис. 5.7). Топливо сжигалось в виде дробленки. Сушка топлива в дробильной системе до влажности 22–28 % производилась дымовыми газами со сбросом сушильного агента в камеру охлаждения. Температура в циклонных предтопках поддерживалась в пределах 1600–1650 °С. Никаких признаков образования связанных отложений на ширмах и конвективных поверхностях нагрева обнаружено не было, что определилось наличием высокотемпературного горения и высокотемпературной обработкой золы в циклонных предтопках и в камере дожигания. Коэффициент шлакоулавливания составил 80 % с нормальным вытеканием жидкого шлака в течение всего времени. Котел проработал на назаровском угле 800 часов со средней нагрузкой 130–135 т/ч. Паропроизводительность котлоагрегата ограничивалась недостаточной сушильной производительностью систем пылеприготовления. Очисток конвективных и радиационных поверхностей нагрева в течение всего опытного сжигания не производилось.

Для сжигания малореакционных топлив ВТИ разработал вертикальный циклонный предтопок (рис. 5.8). Эксплуатация цилиндрических предтопок выявила лучшую их приспособленность к сжиганию малореакционных топлив ( $V^{daf} < 10$  %) и топлив с более тугоплавкой золой.

Одним из направлений в реабилитации технологии сжигания угля с ЖШУ является разработка предтопок (комбастеров), устанавливаемых на входе в основную топочную камеру, с высокотемпературным подогревом воздуха (до 1000 °С). В опытных конструкциях фирмы TRW (США) достигнута степень улавливания минеральной части топлива 90 % при выгорании горючей массы 99,5 %, концентрация оксидов азота за котлом до 300 мг/м<sup>3</sup>.

Выполненные конструкторские разработки, созданные промышленные и полупромышленные установки показали возможности нашего энергомашиностроения и эксплуатационного персонала в создании совершенных современных аппаратов.

Однако в конечном счете направление высокотемпературного сжигания угля не нашло применения в отрасли, чему способствовал ряд причин: утрата интереса со стороны руководства отрасли в связи с массированным переводом угольных электростанций на природный газ,

ряд технологических и конструктивных недоработок циклонных аппаратов, усложнение эксплуатационного и ремонтного обслуживания котлов с циклонными предтопками.

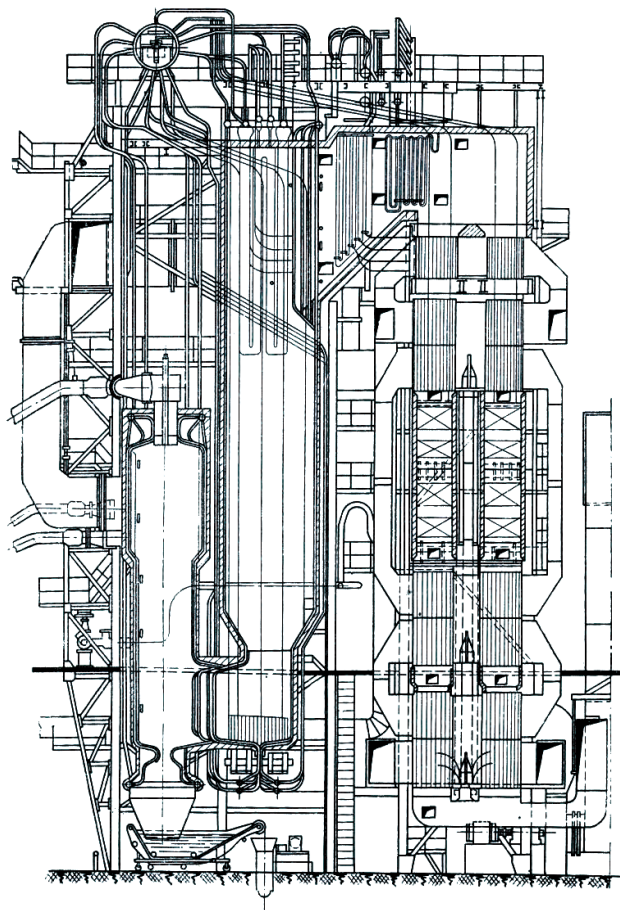


Рис. 5.8. Котел ТП-6 паропроизводительностью 230 т/ч с вертикальным циклонным предтопком ВТИ

Несмотря на то что огромный пласт нашей отечественной инженерно-технической культуры, связанный с циклонными технологиями, находится вне интересов современных энергетиков-практиков, значимость выполненных исследований вихревых течений двухфазных сред, процессов плавления золы, конструкторских разработок не утрачена. Они не только представляют исторический интерес, но и служат источником научно-технической информации, уроками инженерно-технического творчества.

## **5.5. Локальные высокотемпературные зоны в топке**

---

### *1) Поддержание процесса горения низкокачественного угля ограничением теплоотвода к экранным поверхностям*

Наиболее обширная локальная высокотемпературная зона формируется в полузакрытой топке с ограниченным теплоотводом к экранным поверхностям с натрубной обмуровкой. Эта часть топки отделяется от основного топочного пространства выступом, организующим высокотемпературную плавильную камеру, переводящую в расплав основную массу минеральной составляющей угля и обеспечивающую условия воспламенения и выгорания тощих и низкокалорийных углей.

Более компактная высокотемпературная зона в топке создается с помощью т. н. зажигательного пояса — участка поверхности экранов НРЧ и СРЧ, покрытых обмуровкой на высоту горелочного пояса. Для футеровки зажигательных поясов применяют хромитовые или карбидкремниевые огнеупорные набивные массы. Зажигательный пояс позволяет сжигать топлива с низкой теплотой сгорания (до 8400 кДж/кг).

### *2) Повышение температуры пылеугольного факела при сжигании низкорекреакционного угля*

Локализовать повышение температуры в пределах факела низкорекреакционного угля с недостаточным выходом летучих возможно различными способами — путем активации угольной пыли (предварительная термообработка угольной пыли, использование ультратонкой пыли, озонирование поверхности угольных частиц), переходом на сжигание высококонцентрированной аэросмеси, использованием пылеконцентраторов при многоярусной компоновке (за счет уменьшения поступления влаги в нижнюю часть топки и повышения концентрации топлива в аэросмеси в нижнем ярусе горелок). Все это способствует повышению максимальной температуры факела на 50–200 °С.

### *3) Оптимизация температурного режима сжигания низкокачественных высоковлажных углей*

Для низкокачественных высоковлажных топлив непременным условием устойчивости процесса факельного сжигания является всемерное повышение адиабатической температуры горения. Решение этой задачи и проведение необходимых мероприятий детально рассмотрены в обшир-



ной литературе, в частности в работе [20]. Для сжигания топлива с теплотой сгорания до 8400 кДж/кг, при использовании пылесистемы прямого вдувания, целесообразно разделение аэросмеси с помощью пылеконцентратора центробежного типа на подаваемый в горелку поток обогащенной топливом аэросмеси пониженной влажности, с уменьшенным содержанием балласта, и второй поток, обедненный пылью, с повышенным содержанием влаги, поступающий в сбросные горелки над основным горелочным поясом либо непосредственно в атмосферу (рис. 5.9).

При поступлении менее калорийных топлив наиболее существенным является сброс всего увлажненного сушильного агента в атмосферу. Таким путем осуществляется сжигание лигнита с удельной теплотой сгорания 4000 кДж/кг при влажности на рабочую массу 60 %, зольности на сухую массу 16,7 %.

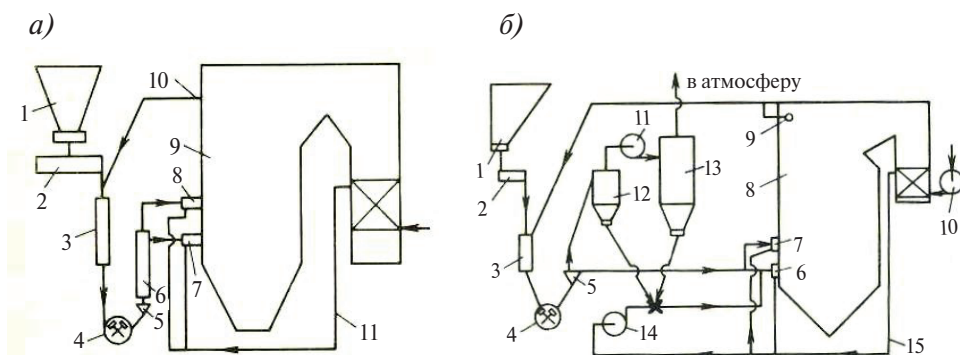


Рис. 5.9. Схема организации факельного сжигания низкокалорийного угля:

а) с пылеконцентратором: 1 — бункер сырого угля, 2 — питатель, 3 — сушильная шахта, 4 — мельница, 5 — сепаратор, 6 — пылеконцентратор, 7 — горелка, 8 — сбросная горелка, 9 — газозаборное окно, 10 — поток продуктов сгорания на сушильную шахту, 11 — тракт горячего воздуха;

б) со сбросом сушильного агента в атмосферу: 1 — бункер сырого угля, 2 — питатель, 3 — сушильная шахта, 4 — мельница, 5 — сепаратор, 6 — горелка, 7 — сбросная горелка, 8 — топка, 9 — газозаборное окно, 10 — вентилятор, 11 — мельничный вентилятор, 12 — циклон, 13 — батарейный циклон, 14 — вентилятор горячего дутья, 15 — тракт горячего воздуха

Таким образом, при сжигании низкокалорийного угля соблюдается общий принцип — предотвращается поступление в зону воспламенения и активного горения основной массы топлива его негорючих компонент (влаги, золы). При этом обеспечивается по существу физическое облагораживание топлива.



#### 4) Подсветка факела низкорекреационного, тощего угля высококалорийным топливом

Применяя подсветку факела тощего угля с малым выходом летучих высокорекреационным топливом, возможно повысить температуру в локальной зоне воспламенения аэросмеси до необходимого уровня. При растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения (подсветки) пылеугольного факела в мировой и отечественной практике используют природный газ или топочный мазут. В мире на эти цели расходуют более 50 млн т мазута в год. На наших ТЭС ежегодно сжигают более 5 млн т мазута.

В тех случаях, когда качество угля исключает надежное воспламенение и стабильное горение без подсветки высокорекреационным топливом, целесообразно использовать топки с жидким шлакоудалением.

#### 5) Надподовые горелки для стабилизации схода жидкого шлака

Для преодоления затруднений со сходом жидкого шлака осуществляется ряд мероприятий, направленных на повышение вязкости шлака. Однако не во всех случаях (особенно при сжигании низкокачественных топлив с низкой температурой факела) мероприятия, связанные с организацией факела основных горелок котла, достаточны для исчерпывающего решения проблемы.

Для решения проблемы эвакуации шлакового расплава из топки котла с жидким шлакоудалением были разработаны специфические горелочные устройства — надподовые горелки. Они устанавливаются в непосредственной близости от поверхности расплавленного шлака, накапливающегося на поду топки. Используя высокорекреационное топливо (мазут, природный газ), подовые горелки создают локальную зону активного горения и интенсивного тепловыделения, *сохраняя неизменным температурный уровень в основной зоне активного горения*. В результате имеет место локальное повышение температуры в топке над поверхностью пода, и вязкость шлакового расплава снижается.

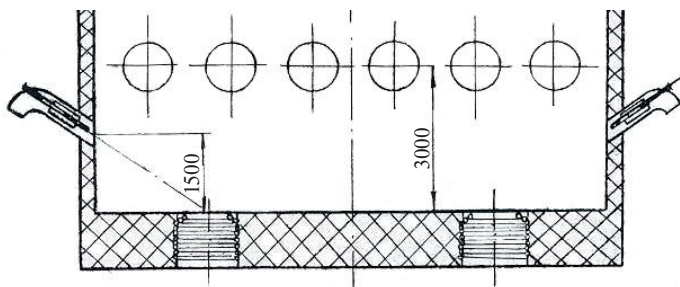


Рис. 5.10. Установка надподовых газовых горелок (котел ТП-87)

Подобная система надподовых горелок установлена на котлах ТП-87 (топливо — кузнецкий уголь СС). Основные пылеугольные горелки установлены встречно на передней и задней стенке топочной камеры (по шесть горелок в один ярус). Две надподовые горелки установлены наклонно на боковых стенках топки ниже отметки основных горелок (рис. 5.10). Оси надподовых горелок ориентированы на устье леток. Однако в полной мере задача была решена с переводом котла на сжигание высококонцентрированной аэросмеси и повышением максимальной температуры факела на 180–220 °С.

## 5.6. Пути реализации низкотемпературных топочных технологий

### 5.6.1. Условия сжигания низкорекреационного топлива в вихревых топках

Эффективное сжигание низкорекреационного топлива может осуществляться и в низкотемпературной топке с увеличением времени пребывания топливных частиц в реакционной зоне за счет многократной циркуляции топливных частиц в вихревых структурах, подобных рассмотренной выше системе НТВ.

В схемах низкотемпературного сжигания топлива эффективность выгорания при ограниченных габаритах топочной камеры достигается различными технологическими и техническими решениями:

- включение в теплообменные процессы в топочной камере слабо используемых экранных поверхностей НРЧ и холодной воронки путем изменения схемы движения факела и топочных газов *со снижением температурного уровня топочного процесса*;
- *увеличение времени пребывания топливных частиц в реакционной зоне* за счет многократной их циркуляции по замкнутому контуру в топке при переходе от прямоточной аэродинамической структуры потока топочных газов к системе вихрей:
- *переход от прямолинейной траектории основного факела в топке к S-образной траектории* с соответствующим увеличением времени пребывания топлива в зоне активного горения.

Технология НТВ (низкотемпературного вихря) является одним из вариантов низкотемпературного топочного процесса. В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания, где основная часть топлива (до 92–96 %) сгорает в зоне активного горения, расположенной

в районе горелок и занимающей относительно небольшой объем камерной топки, в вихревой топке с НТВ-технологией сжигания в зону активного горения вовлечен значительно больший объем топочного пространства. Поэтому тепловое напряжение объема зоны активного горения в НТВ-топке в 1,5–2 раза ниже. Это дает возможность снизить максимальную температуру в вихревой топке примерно на 100–300 °С и за счет активной аэродинамики выровнять уровень температуры в объеме вихревой зоны (рис. 5.11). Коэффициент избытка воздуха в горелках составляет 0,5–0,8. При переходе к технологии НТВ происходит выравнивание температурного поля и снижение максимальной температуры в ядре горения до 1000–1250 °С. При этом происходит меньшая оплавленность горячей частицы топлива, что обеспечивает большую поверхность реагирования.

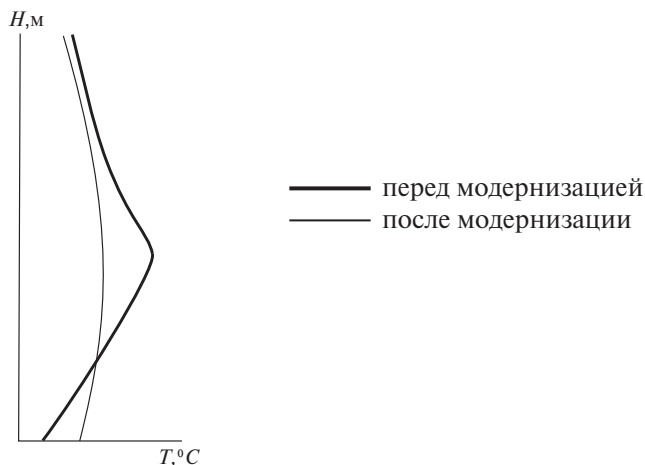


Рис. 5.11. Характер изменения профиля температуры по высоте топки в режиме НТВ

Эффективность системы НТВ носит комплексный характер.

1. Загрузка вихревой зоны НТВ-топки топливом угрубленного помола упрощает систему подготовки топлива, увеличивая ее производительность в 1,3–1,4 раза, обеспечивая взрывобезопасность, снижение затрат электроэнергии на размол. Пониженный уровень температуры, ступенчатый ввод окислителя, многократная циркуляция горящих топливных частиц и угрубление гранулометрического состава золы в совокупности обеспечивают улучшенные показатели вихревых топок по вредным выбросам оксидов азота и серы, а также повышают эффективность работы золоулавливающего оборудования котельной установки. В НТВ-топке созданы благоприятные условия для связывания оксидов серы. Низкий

уровень температуры определяет активное связывание оксидов серы оксидами  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  минеральной части топлива.

2. В режиме НТВ величина падающих тепловых потоков примерно в два раза ниже, чем для аналогичных котлов с факельным сжиганием. Однако за счет увеличения конвективной составляющей радиационно-конвективного теплообмена между факелом и тепловоспринимающими экранными поверхностями и за счет смещения максимальных температур в пристенные области коэффициент тепловой эффективности экранов  $\psi$  заметно увеличен — до 0,5–0,6. В ряде случаев требуется организация локальной защиты экранов путем организации пристенной газовой завесы с использованием холодных рециркулирующих газов. Такая организация топочного процесса позволяет избежать шлакования поверхностей нагрева.

3. В силу малозатратности реализации технологии низкотемпературного сжигания могут способствовать повышению эффективности действующих топочных устройств, прежде всего улучшению воспламенения и выгорания топлива. Об этом свидетельствует успешный опыт реконструкции большой группы котлов по схеме НТВ.

4. Накопленный опыт низкотемпературного сжигания позволяет систематизировать основные достоинства технологии (по сравнению с технологией прямоточного факела) в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Технологические особенности технологии НТВ

Особенности процесса НТВ	Последствия внедрения рабочего процесса НТВ
Быстрый прогрев топливно-воздушной струи	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Стабильное воспламенение и горение;</li> <li>• отказ от «подсветки» факела газом или мазутом;</li> <li>• устойчивый процесс горения</li> </ul>
Интенсификация теплообмена (увеличение тепловой эффективности экранов)	Возможность повышения паропроизводительности котла на 15–20 %
Выравнивание температурного поля, снижение максимальной температуры до 1000–1250 °С	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Отсутствие шлакования и загрязнения топочных и конвективных поверхностей нагрева;</li> <li>• снижение выбросов <math>\text{NO}_x</math> на 20–70 %;</li> <li>• снижение выбросов <math>\text{SO}_x</math> до 70 %</li> </ul>

Окончание табл. 5.1

Особенности процесса НТВ	Последствия внедрения рабочего процесса НТВ
Сжигание топлива угрубленно-го помола	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Улучшение работы золоулавливающего оборудования;</li> <li>• сокращение трудозатрат и материальных ресурсов на обслуживание и ремонт пылеприготовительного оборудования;</li> <li>• снижение взрывобезопасности пылестем за счет угрубления помола топлива;</li> <li>• низкие затраты электроэнергии на подготовку топлива;</li> <li>• повышенный срок службы размольного оборудования</li> </ul>

### 5.6.2. Технология низкотемпературного сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое

К концу XX в. было создано низкотемпературное топочное устройство для сжигания низкорекреационных углей — топка с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), в которой температура зоны горения не превышает 800 °С, что достаточно для воспламенения и выгорания углеродной массы угля, но недостаточно для плавления минеральной массы угля. Интенсивный прогрев и выгорание угольных частиц обеспечиваются в ЦКС за счет достаточного времени пребывания топлива в реакционной зоне в результате его циркуляции по большому контуру: кипящий слой — надслоевая зона топочной камеры — сепарирующее устройство (типа циклона) — тракт возврата в кипящий слой для дожигания [21].

В поточных устройствах с циркулирующим кипящим слоем достигнут предельно низкий уровень температуры в зоне сжигания твердого энергетического топлива. Сниженный температурный уровень процесса обеспечивается присутствием в топке ЦКС большой массы инертной мелкозернистой среды, и температура в зоне горения 800—900 °С приближена к критическому уровню — температуре воспламенения твердого топлива (500—750 °С). Здесь, как и в вихревых низкотемпературных топках, реализуется принцип многократной циркуляции невыгоревших частиц.

За рубежом функционируют более 3000 энергетических котлов ЦКС. Эта сравнительно молодая технология получила распростране-

ние при использовании тощих углей, антрацитов, отходов углеобогащения, горючих промышленных отходов.

Технология ЦКС является комбинацией принципов слоевого и камерного сжигания твердого топлива (рис. 5.12). Воздух через раздающие насадки решетки вдвигается в топочную камеру, где размещается сформированный золой, топливом и известняком слой, который ожигается этим воздухом. Псевдоожижение вызывает турбулентное перемешивание, повышающее эффективность сжигания топлива и реакции известняка с диоксидом серы, образовавшимся при окислении серы топлива. В циркулирующем кипящем слое скорость составляет около 5 м/с (в отличие от стационарного пузырькового слоя, где скорость воздуха и образующихся в топочной камере дымовых газов, низкая — менее 2 м/с) и материал слоя выносится в верхнюю часть топочной камеры. Для возврата этого материала в топку устанавливают сепаратор, уловленный в нем материал, вынесенный из слоя, возвращают в нижнюю часть топочной камеры. Так образуется контур циркуляции твердых частиц, который и дал название технологии.

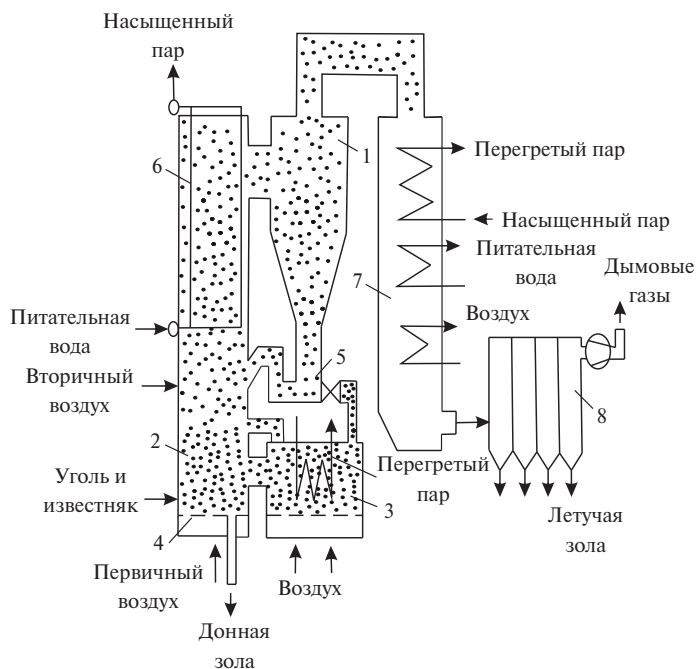


Рис. 5.12. Принципиальная схема котла ЦКС:

- 1 — циклон, 2 — кипящий слой, 3 — камера охлаждения возвращаемых частиц,  
4 — решетка кипящего слоя, 5 — тракт рециркуляции золы,  
6 — пароперегреватель, 7 — конвективная шахта, 8 — электрофильтр

Таким образом, суть технологии ЦКС заключается в обеспечении циркуляции дисперсного материала, состоящего из золы, топлива и известняка, по замкнутому контуру: топка — сепаратор — тракт рециркуляции — топка. При этом скорость газов в топочной камере превышает скорость витания для большей части фракций дисперсного материала. Это приводит к тому, что в системе ЦКС, в отличие от стационарного кипящего слоя, не существует четко выраженной границы между кипящим слоем и надслоевым пространством. Вся топка заполнена дисперсным материалом, концентрация которого без выраженных скачков изменяется от максимума на воздухораспределительной решетке до минимума в верхней части топки. Такое изменение связано с внутритопочной циркуляцией твердой фазы, позволяющей вести эффективный процесс сжигания крупноразмолотого (размер частиц до 20 мм) угля при низкой температуре в топке — 800–900 °С. Наполнитель слоя — твердый инертный материал — играет решающую роль в цикле последовательно развивающихся процессов:

- подогрев свежего топлива до температуры начальной газификации и воспламенения;
- восприятие теплоты сжигаемого топлива;
- теплообмен с поверхностями нагрева за счет интенсивного конвективного и контактного низкотемпературного (800–900 °С) теплообмена большой массы мелкозернистого теплоносителя (на порядок превышающей массу золы поступающего свежего топлива) с экранными трубами, а также сглаживание температурных градиентов в пределах топки.

В слое присутствуют частицы различного фракционного состава, при этом в зависимости от размеров они участвуют в различных процессах:

- **наиболее крупные частицы** (до максимального размера подаваемого топлива 10–20 мм) *постоянно находятся в нижней части топочной камеры*, в пределах плотной части кипящего слоя, который располагается непосредственно на воздухораспределительной решетке; здесь они участвуют в массо- и теплообменных процессах, обеспечивают равномерное распределение по решетке возвращаемого из сепаратора дисперсного материала; за счет длительного пребывания в слое частицы свежего угля выгорают, теряют массу и выводятся из слоя через сток в виде шлака;
- **крупные частицы** (от 1–2 до 10 мм) выносятся из слоя в надслоевое пространство вследствие динамических выбросов при прохожде-



нии оживающего агента через нижнюю плотную часть слоя; они участвуют в неустойчивом свободном движении, циркулируя в пределах топочной камеры, и возвращаются в слой, создавая *внутренний контур циркуляции*;

- **мелкие частицы** (до 0,8–1,5 мм) наполнителя и вновь образующейся золы топлива выносятся из нижней части топки и далее поступают в циклон; при скорости газов в топке 4–5 м/с средний размер циркулирующих частиц составляет 0,1–0,15 мм. Эти частицы (большая часть которых улавливается в циклоне) возвращаются обратно в слой, создавая тем самым основной *большой контур циркуляции* (топка — поворотная камера — высокотемпературный циклон — топка).

В топке котла с циркулирующим кипящим слоем увеличение времени пребывания твердотопливных частиц в топочном пространстве достигается *многократной циркуляцией частиц низкорекреационных топлив*.

Здесь последовательно используются отдельные технические решения:

- начальный прогрев и воспламенение топливных частиц в кипящем слое;
- перемещение частиц, выгоревших полностью или частично, с восходящим потоком топочных газов по высоте топочной камеры, где осуществляется догорание части продуктов неполного горения;
- сепарация частиц из потока топочных газов с помощью циклонных устройств и возврат их в кипящий слой.

Процесс сжигания в ЦКС характеризуется высокими коэффициентами теплоотдачи, равномерным распределением температур в слое, его термической инерционностью и стабильностью.

Технология ЦКС обладает *высокими достоинствами*:

- возможность эффективного сжигания низкокалорийных, высокозольных топлив, а также топлив с малым выходом летучих, которая определяется стабильной температурой в топке, длительным временем пребывания коксозольного остатка в реакционной зоне. В результате имеется значительная экономия вспомогательного топлива, т. к. исключается подсветка мазутом или газом;
- возможность сжигания топлив различного качества в одном и том же котле;
- упрощенная схема подготовки топлива, отсутствие пылеприготовительного оборудования;

- хорошие динамические характеристики, быстрый пуск из «горячего» состояния;
- возможность использования низкосортного (с зольностью до — 65 %) топлива, например отходов углеобогащения;
- маневренность котлоагрегата, способного работать с полезной нагрузкой, составляющей 100—20 % от установленной мощности;

Реализуемый в котлах с ЦКС низкотемпературный уровень топочного процесса определяет его *высокую экологическую эффективность*:

- возможность эффективного (более 90 %) связывания оксидов серы путем относительно дешевого способа подачи известняка в топку, при оптимальной температуре слоя около 870 °С и длительном времени пребывания частиц известняка в реакционной зоне;
- низкие выбросы оксидов азота (менее 200—300 мг/м<sup>3</sup>) без использования специальных средств азотоочистки, которые обусловлены низкой и стабильной температурой слоя и надслоевого пространства при организации ступенчатого подвода воздуха.

Установлено, что при сравнительно высоком коэффициенте улавливания в технологическом циклоне в ряде случаев не удается поддерживать режим стационарного количества циркулирующей массы — смеси угольных частиц и нейтральных минеральных частиц, а именно:

- при интенсивном истирании инертного материала — наполнителя слоя увеличивается доля мелкодисперсных частиц в циркулирующем материале, коэффициент улавливания в циклоне падает, теряется масса циркулирующего материала; требуется постоянное пополнение его сторонним минеральным продуктом (кварцевый песок), так как зола не участвует в пополнении циркулирующей нейтральной массы;
- в случае преобладания в составе угольной золы мелкодисперсной материнской золы, входящей в качестве минеральных соединений в состав углеобразующих растений (что характерно для кузнецких углей), эти частицы золы выводятся из контура циркуляции с топочными газами и не накапливаются в слое.

Из этого следует:

- не все природные инертные материалы пригодны для использования в технологии ЦКС;
- не все угли можно эффективно сжигать в ЦКС.

В российской энергетике использование этой технологии отнесено на будущее. Ее внедрение является одной из проблем развития нашей энергетики. Впрочем, первый котел с ЦКС в нашей стране был создан

в 1997 г. при Уральском политехническом институте (ныне Уральский федеральный университет) на расход топлива 0,10 т/ч [22].

## **5.7. Технология сжигания тощих высокозольных углей в типовых топочных устройствах**

---

Использование одновременно ряда рассмотренных механизмов воздействия на топочный процесс позволяет обеспечить условия эффективного сжигания тощих углей в типовых топочных устройствах, рассчитанных на стандартные угли. Такой подход был реализован в нашей энергетике при переводе большой группы котлов на тощий многозольный экибастузский уголь.

### *Режимы сжигания экибастузского угля*

Классификационным признаком тощих углей является низкий выход летучих — 10–15 %. Исходя из этого критерия, экибастузский уголь при выходе летучих на горючую массу до 27 % не может быть отнесен к тощим углям. Однако воспламеняется он значительно хуже, чем другие виды углей с таким выходом летучих (например, кузнецкий СС).

По условиям воспламенения экибастузский уголь следует рассматривать как тощий уголь. Это связано с тем, что при прогреве угольных частиц происходит не только термическое разложение углеродной массы с выделением летучих горючих, но также термическое разложение минеральных компонентов с выделением инертных летучих — воды,  $\text{CO}_2$ . Поэтому с увеличением зольности угля выход летучих на горючую массу возрастает, однако качество летучих (удельная теплота сгорания) существенно ухудшается. Специфичность протекания процесса горения угольной частицы экибастузского угля заключается в том, что основную роль в длительности выгорания частиц угля играет первая стадия — воспламенение. Условия воспламенения экибастузского угля определяются его качествами (состав летучих, выделяющихся при нагреве частиц угля, зольность), а также температурой топочных газов в зоне воспламенения. Необходимая температура воспламенения, обеспечиваемая рециркулирующими к корню факела топочными газами, составляет для этого угля 850–870 °С. С ростом зольности угля и возрастанием доли твердого балласта тепловые условия зажигания ухудшаются.

С учетом основных специфических особенностей экибастузского угля соответствующие технические решения были направлены, прежде всего, на обеспечение воспламенения и горения. Задача обеспечения стабильности воспламенения, горения и максимального выгорания экибастузского угля обеспечивалась высоким теплонапряжением сечения топочной камеры (до  $6,3 \text{ МВт/м}^2$ ) и вихревыми горелочными устройствами с развитой зоной рециркуляции горячих топочных газов к устью горелки, а также ограничением доли первичного воздуха (не более 0,3) [23].

Зольность угля (количество и минералогический состав) влияет не только на условия воспламенения на выходе из горелки, но также на условия шлакования (хотя экибастузский уголь оценивается обычно как нешлакующий), на условия лучистого теплообмена в топочной камере, температуру газов на выходе из топки. Все эти составляющие топочного процесса, а также повышенный абразивный износ конвективных поверхностей нагрева, низкая эффективность систем золоулавливания, приходилось преодолевать при освоении экибастузского угля.

По этим направлениям были выработаны и реализованы эффективные технологические мероприятия. Длительный опыт наладки топочно-горелочных систем действующих котлов, проводимых параллельно лабораторным стендовым исследованиям, показал, что для обеспечения надежного и устойчивого воспламенения и полного выгорания экибастузского угля необходимо осуществить комплекс режимных и конструктивных мероприятий [24]:

- **крутка потока аэросмеси** аксиальным лопаточным завихрителем, устанавливаемым в канале аэросмеси (угол установки лопаток —  $30^\circ$ ); это позволяет сформировать приосевую высокотемпературную (до  $1200^\circ\text{C}$ ) зону рециркуляции, достаточную для устойчивого зажигания аэросмеси вблизи устья горелки;

- **интенсивная крутка вторичного воздуха** завихрителем с тангенциальной установкой лопаток (угол установки лопаток — до  $50\text{--}60^\circ$ ) также способствует усилению приосевых рециркуляционных обратных токов;

- **встречная закрутка потоков, поступающих из смежных горелок** обеспечивает поддержание крутки потока на выходе в топочную камеру;

- **отказ от стесненной компоновки горелок** позволяет исключить преждевременное активное взаимодействие смежных факелов до за-

вершения их воспламенения с увеличением межгорелочного расстояния (шаг горелок принимается применительно к экибастузскому углю);

- **повышение температуры аэросмеси** до  $140^{\circ}\text{C}$  (от принятых для каменных углей  $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ ) существенно приближает ядро факела к устью горелки, улучшая условия воспламенения и выгорания топлива;

- **более тонкий помол угля** до  $R_{90} = 17\text{--}22\%$  (против  $35\text{--}40\%$  для каменного угля марки СС).

С подобными проблемами энергетики за рубежом сталкиваются крайне редко. Ряд ТЭС на севере Франции был рассчитан на сжигание отходов углеобогащения с содержанием золы  $25\text{--}50\%$ . Для стабилизации процессов воспламенения и выгорания в топку одновременно с этими отходами подавалось качественное высококалорийное топливо, в том числе нефтекокс. Для этого были проведены следующие мероприятия:

- 1) оснащение устройствами для регулирования состава топливной смеси, включающей ряд бункеров с углями различного состава;
- 2) подсветка пылеугольного факела мазутом при  $30\%$ -й нагрузке;
- 3) скорость топочных газов снижена от  $20$  до  $13$  м/с.

При такой организации топочного процесса:

- зашлаковки в топке не отмечалось;
- существенно повысилась загрузка сушильно-размольных устройств;
- не отмечалось загрязнения воздухоподогревателя;
- условия воспламенения и содержание горючих в уносе зависят не столько от зольности смеси, сколько от среднего выхода летучих;
- усиливается золовой износ поверхностей нагрева.

## **5.8. Условия сжигания непроектного энергетического топлива на ТЭС**

---

Принцип узкой специализации топочно-горелочных устройств, жестко приспособленных к сжиганию проектного топлива, в последнее время размывается существенно изменяющимися условиями топливоснабжения ТЭС. За весь многолетний период эксплуатации ТЭС начальная, проектная структура топливного баланса и качество топлива не остаются неизменными. Развитие топливной базы страны, включение в нее новых топлив (в том числе непроектных для ТЭС, низкока-

чественных) ставит перед энергетиками задачу адаптации оборудования для подготовки и сжигания новых топлив путем реконструкции оборудования, модификации режима эксплуатации котла в условиях действующих электростанций. Здесь отраслевая наука и персонал ТЭС сумели решить сложнейшие комплексные проблемы приспособления действующего оборудования станции к новым, непроектным топливам. Не все эти проблемы получили к настоящему времени полное решение. Однако опыт их решения поучителен как пример высокопрофессионального подхода, опоры на подлинно научные представления о топочных процессах и свойствах топлива.

### **5.8.1. Проблемы приспособления действующих угольных и мазутных топочных устройств к использованию природного газа**

Широкомасштабная газификация отрасли представляла сложную техническую и технологическую задачу. Большой объем работ осуществлялся на действующих ТЭС в условиях непрерывного производства. Использование природного газа на ТЭС осуществлялось по следующим основным направлениям:

- организация совместного сжигания исходного топлива (уголь, мазут) с природным газом в общих или отдельных горелочных устройствах; такой вариант позволяет минимизировать затраты на переоборудование топочно-горелочных устройств и, главное, обеспечивает возможность маневрирования с учетом изменения конъюнктуры на топливном рынке, изменения соотношения цен на твердое топливо и газ;
- попеременное сжигание проектного топлива и природного газа позволяет обеспечить максимальную эффективность сжигания обоих видов топлива (которая не всегда достигается при сжигании в одном топочном устройстве топлив с различной реакционной способностью);
- перевод котлов на природный газ с исключением сжигания в нем исходного топлива реализуется в том случае, если при этом устраняются проблемы с дальней транспортировкой угля, обеспечивается надежность газоснабжения; при этом осуществляется демонтаж всего топливоттранспортного, пылеприготовительного оборудования, что исключает возможность в дальнейшем ограничить подачу газа на ТЭС.

Перевод действующих котлов на природный газ потребовал реконструкции систем сжигания, поверхностей нагрева, тягодутьевых машин.

Мощные пылеугольные котлы ТПП-804 блоков 800 МВт Пермской ГРЭС, оснащенные плоскофакельными горелками, были в процессе монтажа переоборудованы на сжигание природного газа. Условия сжигания природного газа полностью обеспечивали все проектные технико-экономические показатели котла, параметры пара, предусмотренные для режима сжигания угля. Однако после реконструкции природный газ стал единственным возможным топливом для этих котлов, поскольку вспомогательное оборудование для угольных энергоблоков (топливоподача, пылеприготовление, золоулавливание) было демонтировано.

Таким образом, за сравнительно короткий период наша энергетика существенно преобразилась: изменились условия эксплуатации, многие экологические проблемы были решены полностью (выбросы золы, складирование золошлаков, функционирование топливного склада, фильтрация и сброс загрязненных вод системы гидротранспорта золы), повысилась маневренность котлоагрегатов, стала более совершенной система управления, компактность обвязки топki топливопроводами.

Вместе с тем переход на сжигание газа на первых порах создавал определенные трудности:

- увеличение содержания влаги с дымовых газов — при сжигании газа образуется 2 кг влаги на кг газа; во многих случаях это приводило к повреждению дымовых труб — кирпичных, бетонных;
- вынос с природным газом твердых частиц, жидких фракций потребовал организации эффективной очистки газа на входе в ТЭС;
- ряд аварий при пуске котлов вследствие взрывов в топке потребовал ужесточения требования по вентиляции газового тракта котла перед растопкой [25].

### **5.8.2. Основные критерии, возможности и условия перехода пылеугольного котла на непроектное твердое топливо**

Технические характеристики твердого топлива позволяют предварительно оценить условия воспламенения и сжигания непроектного топлива в существующих топочных устройствах. Устанавливается



необходимость и конкретные способы корректировки конструктивных и режимных параметров горелок и подготовки топлива:

- тонкость помола;
- скоростной режим горелки;
- соотношение количества первичного и вторичного потоков воздуха;
- общий избыток воздуха в горелке и топке;
- обеспечение начального воспламенения и устойчивости факела выполнением утепляющего пояса на уровне горелок, организацией подсветки факела;
- использование более эффективных растопочных устройств.

Такая корректировка может быть оценена по справочным данным, в частности, такие материал содержатся в «Методических указаниях по проектированию топочных устройств энергетических котлов» (1996 г.). Это позволяет нашим специалистам ограничить проведение экспериментальных работ на стендовых установках и уверенно прогнозировать результативность рекомендаций. Конечно, здесь речь не идет о принципиально новых для ТЭС видах твердого топлива — нефтяном коксе, горючих отходах различного происхождения.

Важно подчеркнуть, что проблема перехода на новый вид топлива, на уголь, отличный от проектного, не ограничивается проблемами формирования факела. В наибольшей мере она затрагивает весь цикл транспортировки и подготовки топлива к сжиганию, последствия сжигания данного топлива — шлакование, износ, улавливание в электрофильтрах золы.

В работах Алехновича А. Н. и других специалистов УралВТИ показано, что объем традиционных показателей качества твердого топлива (технический и элементный состав, химический состав золы, плавкостные характеристики, показатель размолоспособности, состав минеральной части топлив и др.) не позволяет в полной мере прогнозировать поведение угля по всей технологической цепочке ТЭС и выявить возможные ограничения в работе оборудования [26]. Необходимо еще ряд данных:

- для оценки работоспособности оборудования топливоподачи необходимы как минимум данные о смерзаемости, сыпучих и реакционных свойствах (устойчивость к окислению и самовозгоранию) угля;
- для прогноза применимости и работоспособности систем пылеприготовления нужны сведения о размольных, абразивных и взрыво-

опасных свойствах топлива, расчеты достаточности размольной и сушильной производительности пылесистем;

– для оценки ограничений по котельно-топочному устройству важны данные о шлакующих, загрязняющих, реакционных (выход и теплота сгорания летучих) свойствах угля, абразивных, коррозионных свойствах продуктов сгорания;

– для топок с жидким шлакоудалением необходима оценка вязкости шлаковых расплавов.

Возможные ограничения в работе оборудования выявляются в ходе опытно-промышленного сжигания. Наиболее полная оценка возможности перестройки топливного баланса может быть получена путем опытного сжигания вновь привлекаемых углей. На ряде уральских ТЭС в начале первого десятилетия XXI века было проведено опытное сжигание углей различного качества для замещения экибастузского угля — Аргаяшская ТЭС (бурый ирша-бородинский уголь), Рефтинская ГРЭС (кузнецкие угли марки СС, ДГ, ДГР, богословский, буланашский), Серовская ГРЭС (хакасский уголь), Верхнетагильская ГРЭС (томьусинский, ольжерасский угли). Результаты этих работ показали, что возможность перехода на новый уголь при сохранении существующего котельно-топочного оборудования определяется не только степенью сродства экибастузского и замещающего углей, но также конструктивными особенностями топочной камеры, горелочных устройств систем пылеприготовления и топливоподачи. В ходе испытаний было установлено:

1. Нецелесообразно использование кузнецкого угля марки СС на котлах ПК-14 с инерционными сепараторами, что связано с неустойчивостью горения и низкой экономичностью;

2. Хакасский уголь может успешно сжигаться на котлах типа ПК-14 с различными типами сепараторов, при условии проведения мероприятий по взрывобезопасности пылесистем, реконструкции течек ПСУ;

3. Кузнецкий уголь марки СС может сжигаться в топке котла ПК-14 с центробежными сепараторами и турбулентными горелками;

4. Нецелесообразно использование ольжерасского угля на котле ПК-14 по причине низкой экономичности котла в этом режиме и неустойчивости горения;

5. Томьусинский уголь может использоваться на котле ПК-14 как альтернатива экибастузскому углю при условии реконструкции течек,

ПСУ, проведения мероприятий по предупреждению пожаров и взрывов на пылесистемах котла;

6. Кузнецкий уголь марки СС принципиально обеспечивает надежность и экономичность работы котла П-57.

### **5.8.3. Совместное сжигание различных топлив**

В истории отечественной энергетики совместное сжигание различных топлив выступает в различных качествах:

- как вынужденное решение при многотопливной структуре топливного баланса ТЭС с использованием различных по видам и качеству топлив, из которых ни одно не может самостоятельно обеспечить расчетную нагрузку;
- как коммерчески целесообразное решение, позволяющее ограничить использование наиболее качественного, дорогого топлива подмешиванием менее качественного, дешевого топлива;
- как способ повышения устойчивости воспламенения и выгорания низкорекреационного топлива подсветкой факела качественным топливом — мазутом, природным газом;
- как метод утилизации в топках энергетических котлов горючих отходов;
- как вынужденное решение при необходимости использования местных топлив, обеспечивая решения социальных проблем занятости населения;
- как средство направленного воздействия на отдельные характеристики топочного процесса — снижение вредных выбросов, повышение температурного уровня процесса для улучшения схода жидкого шлака.

При переходе к совместному сжиганию различных топлив возможно определенное снижение уровня экономичности котла с учетом приоритетности поставленной цели. Однако безусловным требованием во всех рассмотренных случаях, независимого от мотивации совместного сжигания, является соблюдение общих требований организации топочного процесса — надежная работа топочно-горелочных устройств, устойчивое воспламенение, стабильность факела, поддержание расчетных параметров пара, предотвращение шлакования, отложений и повреждения поверхностей нагрева, ограничение вредных выбросов.

#### **5.8.4. Совместное сжигание природного газа и угольной пыли**

В ходе газификации энергетической отрасли в России большое количество котлов, запроектированных для сжигания твердого топлива, переведены на работу с попеременным сжиганием твердого и газообразного (жидкого) топлива либо в режим совместного сжигания. Причем соотношение твердого и газообразного топлива меняется в очень широких пределах, как в течение суток, так и в течение года (сезонные колебания). Накопленный в этом направлении опыт по оптимизации топочного процесса при совместном сжигании угля и газа позволяет рекомендовать для предприятий газовой отрасли современные энергоблоки с использованием котлов, позволяющих сжигать уголь и природный газ в различных соотношениях. На ТЭЦ Сибирского химического комбината выполнена модернизация котла ТП-10 ст. № 15, предназначенного для работы на твердом топливе — каменных и тощих углях Кузнецкого бассейна и мазуте в качестве растопочного топлива. Реконструкция позволила сжигать в котле, наряду с указанными видами топлива, природный газ. На котле были установлены четыре комбинированные пылегазовые горелки. В испытаниях выявлено, что для котлов ТЭЦ Сибирского химического комбината наиболее приемлемым оказался вариант сжигания пыли и газа в каждой горелке, что обеспечивало равномерную раздачу топлива и возможность работы котла в широком диапазоне качественного регулирования соотношения «уголь/газ», отсутствие необходимости переходить с одного вида топлива на другой и новый розжиг газовых горелок. Однако следует отметить при этом негативное влияние режима совместного сжигания природного газа и угольной пыли на полноту выгорания угля.

Высокорекреационное газовое топливо — природный газ — использовалось для стабилизации горения АШ [25].

#### **5.8.5. Сжигание тощих углей с мазутом**

Мазут как растопочное и резервное топливо для многих угольных электростанций зачастую используется для подсветки основного пылеугольного факела при срабатывании автомата подхвата факела, а также для продолжительной эксплуатации котлов при совместном сжигании с тощими углями.

Основной особенностью таких вынужденных режимов является растягивание процесса выгорания угля, поскольку мазут, являясь бо-

лее реакционным топливом, опережает потребление кислорода. Горение угольных частиц смещается в область потока, забалластированного продуктами сгорания мазута и с пониженной концентрацией кислорода. Исследования в натурных условиях совместного сжигания АШ и мазута показали падение содержания кислорода в контрольном сечении (3 м от устья горелки) от 5,5 до 3,5 %, степень выгорания угля снизилась на 10 % к выходу из зоны активного горения. При участии мазута в формировании факела зона максимальных температур сместилась по потоку при некотором увеличении температуры от 1650 до 1700 °С [27].

Совместное сжигание угля и обладающего более высокой реакционной способностью мазута ухудшает эколого-экономические показатели котлов: на 10–15 % повышается механический недожог топлива и на 2–5 % снижается КПД брутто, возрастает скорость высокотемпературной коррозии экранных поверхностей, снижается надежность эксплуатации котельного оборудования, на 30–40 % увеличивается выход оксидов азота и серы (за счет более высокого содержания серы в мазуте), появляются выбросы канцерогенной пятиокиси ванадия.

Совместное сжигание в одном факеле угольной пыли с большим количеством мазута для подсветки низкореакционного твердого топлива приводит к значительному пережогу твердого топлива. Изменение ситуации обеспечивает использование различных горелок для мазута и угольной пыли. Наибольший эффект достигается размежеванием мазутных и пылеугольных факелов не только по горелкам, но также по отдельным ярусам горелок (например, выделением верхнего яруса горелок для сжигания мазута, нижнего яруса — для сжигания угольной пыли), позволяет улучшить выгорание твердого топлива по мере увеличения доли мазута.

## **5.9. Условия сжигания специально подготовленных топлив**

---

Рассмотренные механизмы формирования и модернизации топочного процесса, использованные для решения широкого круга проблем применительно к энергетическим типовым топливам, используются также при освоении сжигания в энергетических котлах нестандартных специфических топлив и горючих отходов различного происхождения.

### 5.9.1. Организация сжигания водоугольной суспензии

В течение многих лет за рубежом и в нашей стране ведутся работы по переводу угольных котлов на сжигание водоугольной суспензии (ВУС). Опыт зарубежной энергетики показывает, что ВУС может надежно и экономично сжигаться в камерных топках энергетических котлов, несмотря на некоторые технологические сложности (например, износ форсунок-распылителей, повышенное содержание водяных паров в уходящих газах). В отечественной энергетике эта технология остается неосвоенной. В настоящее время ВУС сжигается на нескольких котельных в Кемеровской области, куда топливо доставляется с помощью цистерн. В конце 1980-х был построен опытно-промышленный углепровод Белово — Новосибирск протяженностью 264 километра и производительностью 3 млн т ВУС в год, функционировавший до середины 1990-х. Его основной задачей была апробация способа транспортировки угля на большие расстояния трубопроводным транспортом и его последующее сжигание. Причиной остановки проекта стала экономическая неэффективность. Для того чтобы стать текучей смесью, получаемая суспензия требовала добавления дорогостоящего пластификатора, к тому же во время транспортировки происходило перемерзание пульпопровода и его периодическое забивание. В итоге дело ограничилось накоплением опыта внедрения комплекса по приготовлению транспортировки по трубопроводу Белово — Новосибирск и кратковременному сжиганию ВУС на Новосибирской ТЭЦ-5 в котлах паропроизводительностью 670 т/ч.

В настоящее время интерес к использованию ВУС в нашей энергетике связывается с основными специфическими условиями сжигания ВУС:

- более благоприятные условия воспламенения угольных частиц;
- снижение температуры в топке;
- простота перевода газомазутных котлов на сжигание угля;
- решение ряда экологических проблем;
- нивелирование колебаний качества угля на топочный режим;
- предотвращение шлакования (связанного с плавлением золы в высокотемпературном факеле).

Перевод котлов на сжигание ВУС сопровождается естественным снижением температуры в зоне активного горения. Уровень температуры в отмеченной зоне при переходе от сжигания угля на ВУС (суспензия  $W^* = 48\text{--}52\%$  против  $W^* = 7,0\%$  на пыли) снизился на  $250^\circ\text{C}$ . Вслед-

ствие затягивания процесса воспламенения и выгорания температура топочных газов на выходе из топки возросла на 150 °С.

Установлено, что воспламенение угля в составе водоугольного топлива происходит при более низкой температуре, чем при сжигании аэросмеси. Угли с высоким содержанием летучих (марки Г, Д) воспламеняются в составе ВУС при температурах около 450 °С против 650 °С при сжигании аэросмеси. Температура воспламенения углей с низким содержанием летучих (антрациты) снижается с 950 до 650 °С, что позволяет отказаться от подсветки факела газом и/или мазутом, исключает вероятность шлакования, а также ряда экологических проблем. Возможны различные причины сравнительно раннего зажигания водоугольного топлива (ВУТ):

- возможно, имеет значение механоактивация угольных частиц в дезинтеграторе, кавитаторе в процессе приготовления водоугольной суспензии;
- поверхность тонкоразмолотых угольных частиц может служить активирующим фактором разложения молекулы паров воды с выделением водорода и кислорода.

Следует выделить также следующие особенности сжигания водоугольного топлива:

- при сжигании ВУТ в составе газообразных выбросов полностью исчезают полициклические ароматические углеводороды, являющиеся канцерогенами;
- эта технология приводит также к снижению потребления угля, прежде всего за счет уменьшения механического недожога;
- при сжигании антрацитов в составе ВУТ со сниженной температурой воспламенения не происходит образование жидких шлаков в котле, следовательно, не происходит снижение коэффициента теплопередачи поверхностей теплообмена в результате шлакования, характерного для режимов сжигания угля с высокими температурными характеристиками;
- водоугольное топливо позволяет организовать сжигание твердого топлива в газомазутных котлах.

Последнее обстоятельство имеет особенно важное значение при вынужденном переводе газомазутного котла на сжигание угля.

Для малых котлов использование ВУС также является одним из перспективных направлений. В малообъемных топках актуальной проблемой является недостаточная полнота выгорания топлива. Интервал



времени от ввода ВУС в зону воспламенения для капли водоантрацитового топлива с радиусом 750 мкм составляет 3,5 с. Требуется увеличение времени пребывания частиц в реакционной зоне путем сжигания ВУС в псевдоожиженном слое. Внедрение технологии сжигания водоугольных суспензий в котлах со слоевым сжиганием угля паропроизводительностью до 25 т/ч не завершено [28; 29].

### 5.9.2. Сжигание высококонцентрированной аэросмеси

Развитие системы ПВК (пыль с высокой концентрацией) как рационального способа подачи пыли к горелкам привело к созданию горелочных устройств, в которых высококонцентрированная аэросмесь может поступать в топочный объем без предварительного смешения с первичным воздухом, при этом достигается максимальный экологический эффект (рис. 5.13). Отсутствует разделение воздуха, подаваемого в горелку, на первичный и вторичный, в горелке выполняется общий канал горячего воздуха.

При этом складываются специфические условия сжигания высококонцентрированной аэросмеси:

1) сжигание ПВК осуществляется при минимальном расходе транспортирующего воздуха, не превышающем в данных условиях 0,5–1,0 % теоретически необходимого для сжигания подаваемого топлива;

2) сброс сушильного агента в топку осуществляется здесь помимо горелок через сбросные окна, выполненные несколько выше отметки установки горелок, что приводит к ступенчатому сжиганию при подаче в основные горелки 75–85 % всего организованного воздуха, поступающего в топку;

3) сжигание высококонцентрированной аэросмеси можно отнести к той группе способов сжигания, в которых обеспечивается предварительная термическая обработка топлива до смешения с воздухом в топочном объеме. Однако здесь нет четкого пространственного (аппаратурного) разделения процессов прогрева реагентов и смесеобразования, которые развиваются непосредственно в топочной камере после выхода потока аэросмеси из горелки. Здесь эффект обеспечивается сдвигом во времени этих процессов, последовательным их развитием; необходимое смещение процессов прогрева и смесеобразования во времени достигается за счет минимального расхода транспортирующего воздуха и затягивания процесса смешения топлива с воздухом при формировании стехиометрической смеси;

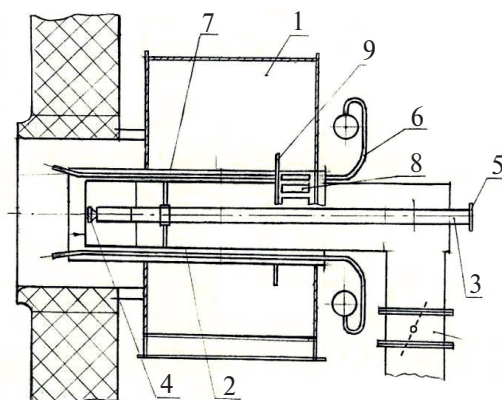


Рис. 5.13. Реконструированная горелка  
для сжигания высококонцентрированной аэросмеси:

- 1 — корпус горелки, 2 — канал центрального воздуха, 3 — патрубок подвода аэросмеси, 4 — рассекатель, 5 — узел примыкания пылепровода, 6 — подвод газа, 7 — защитный кожух, 8 — окна для ввода охлаждающего воздуха, 9 — разделительный диск

4) своеобразен и механизм воспламенения и горения ПВК. Здесь прогрев частиц угля осуществляется в основном за счет лучистого теплообмена, который интенсифицируется при предельно малом количестве транспортирующего воздуха. Прогрев топливных частиц и их дегазация происходят при дефиците кислорода в зоне, непосредственно прилежащей к срезу горелки, при постепенном увеличении его концентрации по потоку. В результате ускоряется прогрев топливных частиц и термическая деструкция угля с выделением летучих (в том числе продуктов распада неустойчивых азотосодержащих соединений топлива) до смешения с основным потоком вторичного воздуха в условиях дефицита окислителя и переводом свободного азота в молекулярный. Воспламенение и горение коксового остатка тормозится, в то же время выгорание летучих способствует прогреву частицы и ускорению ее термического разложения. В итоге возрастает интенсивность тепловыделения в момент воспламенения летучих, мощность начального источника воспламенения в окружающей сферической зоне, интенсифицируется прогрев коксового остатка. На последующем участке пылеугольного факела кислород, не перехватываемый летучими, свободно диффундирует через поверхность пористых частиц, способствуя развитию гетерогенного горения, в отличие от основной массы

летучих, сгорающих в газовой фазе гомогенно. Повышение при этом локальных температур, ускорение выгорания коксового остатка позволяет компенсировать задержку смесеобразования и начального воспламенения смеси на последующих этапах процесса горения.

Свойства системы сжигания ПВК могут быть использованы для улучшения топочного режима:

- повышение устойчивости пылеугольного факела; практика применения систем ПВК на котлах различного типа подтверждает повышение устойчивости топочного процесса при переходе на сжигание высококонцентрированной аэросмеси в условиях нестабильности качества топлива и приспособленности котла, оборудованного системой ПВК, к сжиганию топлива переменного качества (котел ТП-87, кузнецкий уголь с выходом летучих от 9 до 30 %; котел ТПП-210, кузнецкий уголь с выходом летучих от 5 до 18 %; котел ТКП-3, периодическое возрастание зольности угля до 50 %);

- более раннее воспламенение топливовоздушной смеси;

- увеличение максимальной температуры пылеугольного факела (на 150–180 °С), что приводит к снижению температуры топочных газов на выходе из топки и соответствующему снижению температуры уходящих газов (на 3–8 °С, что соответствует уменьшению  $\Delta q_2$  на 0,3–0,4 %) в результате перераспределения тепловосприятия экранов по высоте топки;

- рост температуры в надподовом пространстве в котлах с жидким шлакоудалением, что облегчает эвакуацию шлакового расплава;

- снижение недожога на 20–30 %;

- снижение концентрации оксидов азота на 20–40 %;

- оптимальный избыток воздуха в топке при сжигании ПВК ниже, чем при традиционных схемах сжигания, что приводит к повышению КПД котла за счет снижения расхода энергии на собственные нужды.

Особенности организации пылеугольного факела при использовании ПВК определяют и конструктивные особенности горелок. При этом учитывается положительный опыт сжигания ПВК в горелках различных типов — вихревых, прямоточных, плоскофакельных [30; 31; 32].

### 5.9.3. Организация сжигания угольного полукокса

Если ориентироваться на выход летучих как основную характеристику реакционной способности топлива, то полукокс может оцениваться как низкореакционное топливо. Однако в силу развитой по-

ристой поверхности полукоксовых частиц, приобретенной в процессе термообработки, полукок должен оцениваться как высокореакционное твердое топливо [33]. Горение пылевидных частиц полукокса протекает в режиме, близком к кинетическому. В результате отсутствия подготовительных стадий развития пылеугольного факела (прогрев и дегазация угольных частиц) иницирующая роль горения летучих способствует повышению устойчивости воспламенения и стабильности процесса выгорания косового остатка. Учитывая специфические качества полукокса, можно уверенно прогнозировать эффективность его как энергетического топлива.

Опытное сжигание партии полукокса (около 1000 т), полученного на опытно-промышленной установке из ирша-бородинского бурого угля при температуре 650 °С, проводилось в топке энергетического котла малой производительности, рассчитанного на сжигание кузнецкого тощего угля с малым выходом летучих (что сближает его с полукоксом). Испытания показали надежное воспламенение полукоксовой пыли и устойчивость факела без подсветки мазутом в широком диапазоне нагрузок. Минимально устойчивая нагрузка котла достигается при использовании полукокса.

Таким образом, реакционная способность полукокса, определяющая устойчивость факела и условия воспламенения, оказывается выше реакционной способности кузнецкого угля. Содержание горючих в уносе при сжигании полукокса ниже, чем при сжигании кузнецкого угля (соответственно 10–17 и 20 %). Потери от механического недожога этих видов топлива практически идентичны, что свидетельствует о совпадении скорости выгорания их коксовых остатков. Такой вывод соответствует результатам проведенных позднее лабораторных испытаний ВТИ, показавших, что время выгорания частиц полукокса канско-ачинского угля практически совпадает со временем выгорания тощего кузнецкого угля. Результаты опытного сжигания бурогоугольного полукокса показывают эффективность его использования в качестве энергетического топлива, не отмечено затруднений в организации топочного процесса, подтверждена высокая эффективность по снижению выхода оксидов азота ( $\Delta\text{NO}_x = 50\%$ ).

Работами ряда специалистов показано, что глубина термической подготовки угольной пыли оказывает значительное влияние на снижение скорости роста вторичных отложений при сжигании полукоксов рядового и окисленного углей. Сжигание полукокса протекает

в окислительной среде в связи с малым выходом летучих, содержание горючих в летучей золе ниже по сравнению с исходным углем. В этих условиях практически будут отсутствовать сульфидно-сульфатные отложения, которые являются основой образования прочных натрубных отложений.

Таким образом, принципиальная особенность технологии энергетического использования угля с предварительной термообработкой (как непосредственно перед вводом в топку, так и при термохимической обработке вне ТЭС) заключается в комплексном решении проблем технологических и экологических. В режиме сжигания термообработанного топлива повышается устойчивость пылеугольного факела при сжигании малореакционных топлив, нивелируется влияние переменного качества топлива, исключается необходимость подсветки пылеугольного факела мазутом. Одновременно достигается снижение выхода оксидов азота.

## **5.10. Сжигание горючих побочных продуктов промышленного производства и добывающих отраслей**

---

### **5.10.1. Организация сжигания нефтекокса в топках энергетических котлов**

Нефтекоксы являются технологически и экологически трудным топливом для энергетического котла. Специфические свойства нефтяного кокса определяют различные способы его сжигания в существующих и специально создаваемых топочных устройствах. Обычно рассматриваются условия воспламенения, выгорания, выброса токсичных веществ, при этом умалчивают о других, не менее значимых проблемах. В частности, это вопросы шлакования, удаления высокотоксичных отложений на поверхностях нагрева, утилизации токсичных шлаков и уловленной золы.

1. Основная масса нефтекокса, производимого в мире, сжигается в существующих пылеугольных котлах в смеси с проектным топливом. Такой способ использования этого топлива реализуется в США, где 54 млн т производимого кокса сжигается на тридцати угольных электростанциях. При этом, поддерживая определенное соотношение угля

и нефтекокса, удастся нивелировать некоторые специфические свойства нефтяного кокса (по воспламенению, возгоранию, влиянию на коррозионные процессы, высокому содержанию углерода в уносе и отложениям в конвективной шахте, увеличенному выбросу оксидов серы, а также ванадия и других тяжелых металлов). При наличии на ТЭС эффективной системы пылеулавливания и сероочистки (для режима сжигания угля) подмешивание нефтекокса не создает экологических проблем. При отсутствии сероочистки, невысокой эффективности золоуловителей требуются ограничения по количеству сжигаемого нефтекокса.

Результаты проведенных в нашей стране испытаний по сжиганию нефтяного кокса в топке котла ТП-81 показали возможность эффективного и экологически безопасного сжигания нефтекокса в смеси с кузнецким углем (доля кокса — 50 %) при тонине помола пыли по остатку на сите  $R_{90}$  около 8 %. Установлена необходимость соблюдения ряда условий при совместном сжигании кокса и угля [34]:

- для предотвращения коррозии поверхностей нагрева по всему тракту пылеугольного котла необходимо поддержание повышенной температуры холодного воздуха на входе в воздухоподогреватель (до 60–80 °С) за счет рециркуляции части подогретого воздуха, что позволяет исключить развитие низкотемпературной коррозии;

- сжигание кокса и коксоугольной смеси смещает ядро факела в верхнюю часть топки, увеличивая температуру на входе в пароперегреватель — наиболее теплонапряженный конструктивный узел котла, а также в районе воздухоподогревателя, возможно выше допустимого уровня. Поддержание расчетных (либо близких к ним) показателей по температуре металла поверхностей нагрева осуществляется выбором приемлемой доли кокса в смеси с углем, регулированием общего избытка воздуха в топке;

- механический недожог при использовании нефтяного кокса будет характеризоваться выносом из топки недогоревших частиц топлива с высоким содержанием углерода. Поэтому отложения очаговых остатков в конвективной шахте могут при определенных условиях (при автономном сжигании кокса либо при преобладании его в смеси с углем) возгораться. Для предотвращения возгорания нецелесообразно превышать долю кокса в смеси с углем выше 60 %; перед плановым остановом котла для удаления возможного скопления углеродосодержащих частиц целесообразно перейти на сжигание расчетного угля. При внеплановых остановах произвести очистку, обмывку.



2. Автономное использование низкорекреационного нефтекокса в топке с факельным сжиганием без подмешивания угля при условии:

- тонкого размола;
- повышенной температуры в зоне воспламенения коксовой пыли;
- достаточного времени пребывания коксовых частиц в реакционной зоне.

Эти условия реализуются в топке инвертного типа (арочная или плечевая топка), где формируется повышенная температура в начальном участке факела, увеличивается протяженность траектории факела и, соответственно, время пребывания коксовых частиц в зоне горения. Таковы котлы фирмы *Foster Wheeler*, специализирующейся на производстве и поставке котлов для сжигания нефтекокса в пылевидном состоянии, а также фирмы *Mitsubishi Heavy Industries* (МНН) (рис. 5.14).

В котлах для сжигания нефтекокса фирмы *Foster Wheeler* предусмотрены:

- 1) горелки на передней и задней стенке, направленные вниз, образуя в топке факел в виде *W*;
- 2) подача воздуха в горелки на нескольких уровнях с «размазыванием» факела;

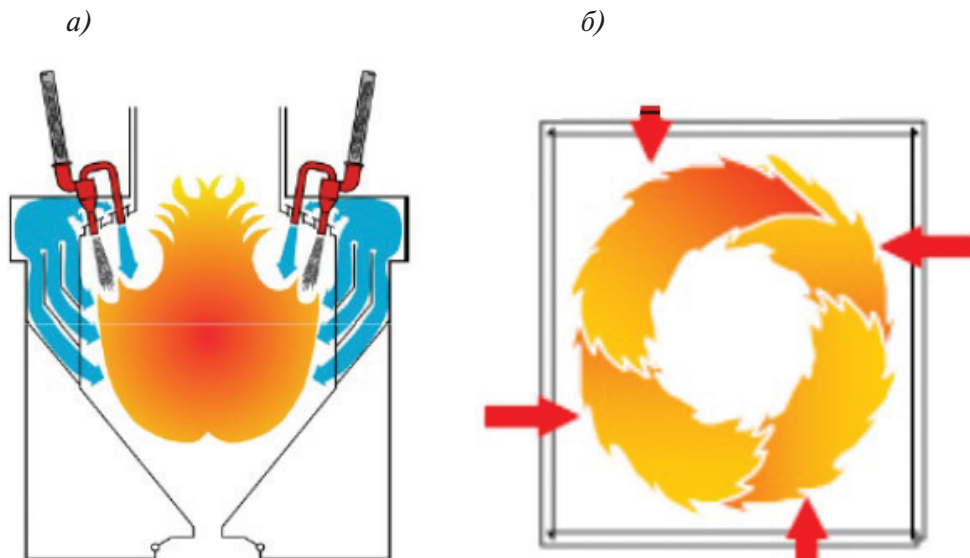


Рис. 5.14. Организация факела при сжигании нефтекокса:  
а) котел фирмы *Foster Wheeler*; б) «ультравихревой» факел в котле фирмы МНН



3) интенсивное подмешивание топочных газов к корню факела. Однако при этом требуется оснащение котла эффективной системой золо- и сероулавливания.

Увеличенное время пребывания коксовых частиц предполагает также конструкции котла с призматической топкой, выполняемой по схеме «ультравихревого» сжигания, как в котлах *МНИ*.

Оптимальным способом сжигания можно считать применение для этой цели котлов с циркулирующим кипящим слоем, где осуществляется многократная циркуляция коксовых частиц в низкотемпературной топке. Хотя здесь также потребуется устройство для очистки дымовых газов.

На нефтехимических предприятиях получаемый нефтекокс подвергается газификации, в результате которой производится топливный газ с калорийностью до  $12,6 \text{ МДж/м}^3$ , а также ряд побочных химических продуктов. Достоинство такой технологии энергетического использования нефтекокса заключается в том, что предотвращение выбросов токсичных веществ, содержащихся в нефтекоксе, сводится к очистке парогазовых продуктов его газификации. При этом исключается поступление в топку этих высокотоксичных веществ и необходимость очистки многократно большего объема дымовых газов.

### **5.10.2. Особенности работы энергетических котлов на попутных нефтяных газах**

Проблема сжигания на ТЭС попутных нефтяных газов (ПНГ) включает два основных аспекта — технологический (условия безопасного и экономичного сжигания этого специфического газообразного топлива) и экологический (сокращение выбросов, выделяемых при горении ПНГ). Поскольку вопрос рассматривается применительно к крупномасштабному потреблению ПНГ, то полагается высокая степень очистки газа от посторонних включений (жидкие фракции, мелкие частицы, соединения серы и прочие). Таким образом, вопрос об очистке ПНГ выносится за пределы технологической схемы производства ТЭС. В котлы подается сухой отбензиненный газ, преимущественно состоящий из метана, теплота сгорания которого составляет в среднем  $48,8 \text{ МДж/кг}$ .

Для реализации требований по предельно допускаемым вредным выбросам в разработанных низкотоксичных газомазутных горелках предусмотрены следующие технические решения: дополнительная

подача газов рециркуляции, использование двухступенчатого сжигания, работа на малых избытках воздуха и оптимальное распределение газа в потоке окислителя.

### **5.10.3. Особенности использования в качестве энергетического топлива шахтного метана**

При организации сжигания шахтного метана необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- нестабильность состава воздушно-метановой смеси, отбираемой из угольных пластов;
- низкая концентрация метана в исходной метано-воздушной смеси, существенно ниже пределов горючей смеси;
- возможность сжигания метана в воздушном потоке с температурой выше 800 °С при сколь угодно малой его концентрации.

Эти условия определяют различные способы утилизации потенциальной тепловой энергии шахтного метана:

- обогащение метано-воздушной смеси до пределов горючей концентрации;
- сжигание метано-воздушной смеси подмешиванием в факел качественного топлива с замещением части дутьевого воздуха;
- нагрев метано-воздушной смеси до температуры выше 800 °С с использованием части выделяемого тепла для нагрева исходной смеси.

В 60-х гг. XX в. специалистами КазНИИ энергетики была разработана камера сжигания шахтного метана в составе газотурбинной установки мощностью 4 МВт (Уральский турбомоторный завод). В основе разработанной технологии и конструкции устройства для сжигания шахтного метана лежит положение о том, что при температуре воздуха свыше 800 °С метан сгорает при любой концентрации в метано-воздушной смеси.

Камера сжигания шахтного метана, показанная на рис. 5.15, выполнена в виде вращающегося регенеративного теплообменника. Насадка 1 теплообменника имеет кольцевую форму, набирается из отдельных керамических блоков и пластин из листовой стали.

Она размещается на платформе 5 с роликовыми опорами, приводимой во вращение приводом 6. Поток нейтрализуемых газов проходит по каналам насадки в радиальном направлении. Реакционной камерой служит внутренняя полость, ограниченная с боков насадкой, а сверху — крышкой 3 и платформой 5. Горелки для начального разо-

грева насадки 4 монтируются на крышке 3. Они могут также служить для компенсации недостатка тепла, выделяемого шахтным метаном, сглаживая колебания его теплоты сгорания.

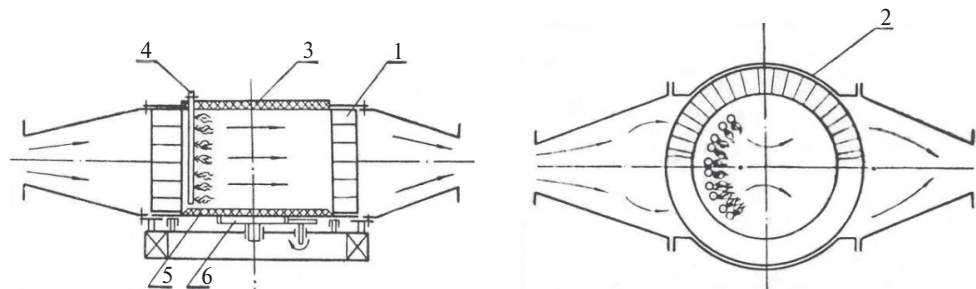


Рис. 5.15. Схема устройства для сжигания шахтного метана:

1 — насадка устройства, 2 — корпус, 3 — крышка, 4 — горелки,  
5 — платформа, 6 — привод

Испытания полноразмерной конструкции камеры сгорания шахтного метана для ГТУ-4 проходили на стенде завода-изготовителя. Температура подогрева воздуха превышала  $700^{\circ}$  (при использовании в качестве материала насадки керамики и стали 1X18 Н9 Т). Проект газотурбинной установки на шахтном метане мощностью до 4 МВт не был реализован.

К настоящему времени созданы высокотехнологичные мембранные установки «Грасис», которые позволяют изменить теплотворную способность шахтного газа с высоким содержанием азота и подготовить его в качестве топлива для ГТЭС, ГПТС, котельных.

#### 5.10.4. Сжигание технологических газов металлургического производства

Металлургические и коксохимические заводы являются мощными производителями технологических горючих газов — побочных продуктов основного производства. Выход колошникового газа при доменном производстве составляет 0,235 т у. т. на 1 т чугуна. При суточном выпуске доменной печи 4000 т чугуна только одна такая печь может выдать около 6–6,5 млн  $\text{м}^3$  газа.

##### 1) Использование доменного газа

Доменный газ является сопутствующим продуктом выплавки чугуна и ферросплавов в доменных печах. Его состав формируется в результа-

те сгорания кокса и топливных добавок в воздухе с различным содержанием кислорода в горне, восстановления железа и других элементов чугуна, разложения известняка и других процессов, протекающих в доменной печи. Используется как газообразное топливо в доменном цехе для нагрева насадок регенеративных воздухонагревателей, в других цехах металлургических предприятий и на коксохимических заводах. Состав доменного газа зависит от технологии доменного процесса и марок выплаваемого чугуна, расхода кокса, степени обогащения кислородом и увлажнения дутья, количества вдуваемого природного газа в печь. Основными горючими веществами доменного газа являются монооксид углерода и водород. При выплавке передельного чугуна содержание  $\text{CO}$  в доменном газе составляет 23–30 %, водорода — 1,5–9 %. Также в доменном газе содержится до 0,5 % метана.

Выход доменного газа при выплавке 1 т чугуна колеблется от 1600 до 2100 м<sup>3</sup>. С уменьшением удельного расхода кокса на 1 т чугуна выход доменного газа снижается. Плотность доменного газа в зависимости от его состава колеблется от 1,25 до 1,37 кг/м<sup>3</sup>. В доменном газе после выхода из печи содержится до 3,5 % влаги, которая образуется при восстановлении железа. Наибольшая теплота сгорания доменного газа составляет 6900 кДж/м<sup>3</sup> при выплавке ферромарганца с обогащением дутья кислородом; наименьшая — около 3000 кДж/м<sup>3</sup> при выплавке передельного чугуна. Температура воспламенения доменного газа зависит от его состава, примерно равна 650–700 °С.

Доменный газ является низкопотенциальным топливным газом. Большая часть используется в доменном цехе для нагрева насадки воздухонагревателей до температуры 1200–1400 °С. При подаче на горелки его обычно смешивают с коксовым газом, имеющим более высокую теплоту сгорания. Доменный газ, содержащий до 50–60 г/м<sup>3</sup> пыли, должен быть очищен от пыли перед его отправкой потребителям — на коксовые батареи, на горелки доменных воздухонагревателей и др. — до достижения концентрации пыли не выше 10 мг/м<sup>3</sup>.

## *2) Использование коксового газа*

Коксовый газ получают одновременно с коксом в печах коксохимических заводов, при сухой перегонке каменного угля в пределах температур от 900 до 1200 °С. Газ является продуктом термического разложения веществ, составляющих уголь. Коксовый газ, получаемый в печах для производства кокса для доменной печи, имеет большое значение в топливном балансе страны. При ежегодной выработке около

80—85 млн т кокса получается более 25 млрд м<sup>3</sup> коксового газа. Коксовый газ является одним из лучших технологических газообразных топлив благодаря своей высокой теплотворной способности (14—18 МДж/м<sup>3</sup>), температуре горения, небольшому количеству балласта (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), относительно высокому содержанию CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в продуктах горения, что обуславливает его широкое применение в различных топливопотребляющих агрегатах. Основными потребителями коксового газа, а также смесей его с бедными (доменным, генераторным) газами как топлива являются:

- 1) коксовые печи и доменные печи;
- 2) мартеновские печи;
- 3) нагревательные печи и устройства (колодцы блюмингов и пр.) прокатных цехов;
- 4) энергетические котлы заводской ТЭЦ.

Наиболее значительно по объему использование технологических газов на ТЭЦ при металлургических заводах.

Условия обогрева перечисленных топливопотребляющих агрегатов в отдельных случаях различны, что обуславливает изменение требований к условиям сжигания газа. Так, например, для обогрева мартеновских печей необходим факел ограниченной длины, т. е. усиление перемешивания газа и воздуха и максимальная турбулизация потока. При обогреве коксовых печей необходимо максимально вытянуть факел пламени, т. е. удлинить время перемешивания газа и воздуха (ухудшить смешение). При обогреве газом паровых котлов наиболее рационально предварительное смешение газа и воздуха. Потребителями газа являются регенеративные воздухоподогреватели доменного дутья, коксовые цеха, промышленные ТЭЦ.

### *3) Использование конверторных газов*

Конверторный газ состоит в основном из CO (>60 % об.) и небольшого количества водорода, остальное — инертные газы (N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>). Газы, выходящие из конвертера с температурой 1500—1800 °С и охлаждаемые до температуры 900 °С в котлах-утилизаторах, поступают в газоочистку, в которой концентрация пыли снижается до 120 мг/м<sup>3</sup>. После газгольдера газы поступают в электрофильтр мокрого типа, где проходят доочистку до концентрации 10 мг/м<sup>3</sup>, и затем компрессором подаются в газопровод. После охлаждения и очистки газы с теплотой сгорания около 8,4—10,5 МДж/м<sup>3</sup> могут быть использованы как топливо. Однако при этом следует учитывать периодичность выхода конверторных газов. Поэтому использование тепла конвертерных газов возмож-

но при смешении их с доменным, коксовым или природным газами, что позволит сгладить пиковый характер выдачи конвертерного газа.

### **5.11. Использование на ТЭС возобновляемых источников энергии и горючих бытовых отходов**

---

Сжигание альтернативных топлив в топках энергетических котлов представляет собой самостоятельные инженерно-технические и экологические задачи. Для их решения требуется индивидуальный подход для каждого случая использования такого топлива с учетом специфических его свойств. Речь идет не только о приспособлении имеющихся энергетических котлов, но и создании энергетических котлов со специализированными топочными устройствами.

#### **5.11.1. Технологии использования древесины и древесных отходов в энергетике**

Древесина в исходном состоянии обладает низшей теплотворной способностью 8100 кДж/кг (влажность — 50 %).

В современных условиях уже невозможно возвращение к освоенной в начале XX в. технологии сжигания древесины в энергетических топках, когда на решетку поступали крупные поленья, дрова [35; 36]. Сжигание древесины в крупных масштабах для производства энергии предусматривает подготовку этого сырья — подсушку, дробление. Основным способом использования древесины и древесных отходов в маломощных котлах является их прямое сжигание в слоевых топках, факельное сжигание, а также сжигание в котлах с кипящим слоем. Известны технологии, предусматривающие подачу в топку продуктов термохимической переработки древесины, основу которых составляют процессы газификации, пиролиза, сжигания в шлаковом расплаве и т. д., в том числе с использованием плазматронов.

Специалисты отмечают проблемы шлакования, загрязнения поверхностей нагрева (в связи с большим содержанием соединений щелочных металлов), а также опасность высокотемпературной коррозии (в связи с высоким содержанием хлора).

Для получения тепловой энергии из древесины используются самые разнообразные топки, предтопочные устройства к существующим котлам, специальные котлы, бойлеры, мини-ТЭЦ и т. д. В европейских странах

разработано и серийно выпускается достаточно много конструкций котлов, работающих на древесном топливе, каждый из которых имеет свою преимущественную область и специфику использования, в частности:

- котлы для маломощных потребителей (например, домашнего использования) с предварительной газификацией древесины позволяют автоматизировать процесс горения и управлять им, но требуют достаточно сухого сырья (влажностью до 20 %);
- котлы с предтопком, в которых можно сжигать щепу с высокой влажностью (до 55 %), но возникают проблемы при сжигании относительно сухого топлива (влажностью до 20 %), связанные с перегревом и повреждением футеровки предтопка;
- котлы со встроенным стокером и водоохлаждаемыми стенками, топки в которых хорошо подходят для сжигания сухого топлива (влажность — 30–35 %).

Содержание серы в древесине очень мало, поэтому эмиссия  $\text{SO}_2$  на установках и станциях, сжигающих древесную биомассу, удовлетворяет установленным нормам без принятия дополнительных мер. Уровень эмиссии  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$  поддерживается в допустимых рамках за счет соответствующего контроля за процессом горения. Продукты сгорания на станциях очищаются только от твердых частиц. Для достижения допустимых концентраций твердых частиц в основном используются мультициклоны, для более тщательной очистки — тканевые и электростатические фильтры.

### 5.11.2. Сжигание твердых бытовых отходов для получения энергии

Основным способом утилизации твердых бытовых отходов является их термическая переработка, прежде всего — их прямое сжигание. Твердые бытовые отходы, используемые в качестве топлива, характеризуются показателями, приведенными в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристики твердых бытовых отходов

Вид отхода	$O_i^r$ , кДж/м <sup>3</sup>	$W^r$ , %	$A^r$ , %
Неподготовленный мусор (бытовые твердые отходы)	5250–9220	20–45	18–45
Подготовленный бытовой мусор	10000–12000	29,1	21,1
Осадок сточных вод	4200–8400	50	13,0



Известны также технологии, основу которых составляют процессы газификации, пиролиза, сжигания в шлаковом расплаве и т. д., в том числе с использованием плазматронов. В настоящее время в мире эксплуатируется более 2 тыс. установок, сжигающих ТБО на механических колосниковых решетках, более 200 топок для термической переработки отходов в кипящем слое, примерно 20 барабанных печей, где сжигают ТБО, а также единичные установки с использованием пиролиза и газификации. Универсальным топочным устройством для ТБО являются слоевые топки. Сжигание ТБО может быть организовано в факельных топочных устройствах, при необходимости оснащаемых дожигательной решеткой. Разработана технология сжигания ТБО в барботируемом шлаковом расплаве [37]. Во всех случаях необходимо предварительное измельчение отходов, позволяющее получить однородный материал.

Для несортированных отечественных твердых бытовых отходов наиболее предпочтительным способом их термической переработки является сжигание в слоевых топках с переталкивающей колосниковой решеткой. Технологию сжигания в вихревом кипящем слое целесообразно использовать для сжигания подготовленных ТБО (например, после их сортировки и дробления) совместно с другими городскими отходами, например осадком сточных вод.

Возможно также осуществление предварительной газификации отходов с подачей полученных газообразных горючих продуктов в топку котла ( $Q_f = 11000\text{--}12000 \text{ кДж/м}^3$ ).

Особенности организации процесса сжигания твердых бытовых отходов заключаются в следующем:

- неравномерность температуры воспламенения отдельных составляющих отходов (от 250 до 750 °С);
- повышенные избытки воздуха в зоне горения (в 2–2,5 по сравнению с качественными твердыми топливами), что увеличивает потери с уходящими газами;
- наличие в мусоре стекла снижает плавкостные характеристики золы, что ограничивает максимальную температуру в зоне горения по условиям шлакования [38].

Экологические проблемы сжигания ТБО и твердых промышленных отходов связаны с высокой токсичностью продуктов сгорания (в 4 раза больше, чем для мазута, и в 20 раз больше, чем для природного газа, близко к выходу загрязнителей для угля). Высокую токсичность про-

дуктов сгорания ТБО определяет наличие соединений свинца, солей токсичных металлов, хлоридов и, прежде всего, диоксинов.

Сера: типичный коммунальный мусор содержит не менее 12 % серы, около 45 % серы выделяется с топочными газами.

Азот: средняя концентрация  $N_2$  в отходах составляет 0,5 % по массе, лишь незначительная часть  $N_2$ , содержащегося в твердых отходах, переходит в  $NO_x$ .

Хлор: характерное содержание хлора (в виде хлоридов) — 0,5 %. В топочных газах присутствует в виде хлористого водорода  $HCl$ , т. е. 80–60 % хлора выделяется в газообразном виде.

Диоксин: наиболее сложной экологической проблемой сжигания ТБО является выделение продуктов окисления хлорорганических ароматических соединений. Для установок огневого обезвреживания отходов основным фактором, влияющим на выбросы диоксинов, является температура отходящих газов. Считается, что при  $t \geq 1450–1500^\circ C$  выделение диоксинов исключается.

По сравнению с сжиганием твердого органического топлива на ТЭС к процессу термической переработки ТБО предъявляются дополнительные требования по охране окружающей среды. По всем показателям нормативы для установок, сжигающих ТБО, в несколько раз жестче, чем для типовых ТЭС на органическом топливе. В табл. 5.3 указаны нормативные выбросы загрязняющих веществ с уходящими газами, принятые в качестве базовых для большинства регионов России при проектировании, строительстве и эксплуатации заводов по сжиганию ТБО и органического твердого топлива.

Таблица 5.3

**Нормативные выбросы загрязняющих веществ с уходящими газами**

Загрязняющие вещества	Энерготехнологические установки, сжигающие ТБО (Директива 2000/76/ЕС)	
	Среднесуточные, мг/м <sup>3</sup>	Среднеполучасовые, мг/м <sup>3</sup>
Твердые частицы	10	30
Монооксид углерода CO	50	100
Оксиды азота $NO_x$	200	400
Оксиды серы $SO_x$	50	200

Окончание табл. 5.3

Загрязняющие вещества	Энерготехнологические установки, сжигающие ТБО (Директива 2000/76/ЕС)	
	Среднесуточные, мг/м <sup>3</sup>	Среднеполучасовые, мг/м <sup>3</sup>
Хлористый водород HCl	10	60
Фтористый водород HF	1	4
Тяжелые металлы: ртуть Hg кадмий, талий Cd, Tl суммарно другие (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	Средние пробы 0,05 0,05 0,5	
Диоксины и фураны	0,1 нг/м <sup>3</sup> (при нормальных условиях)	

Значения даны для сухих газов, приведенных к стандартным (нормальным) условиям (температура — 101,3 кПа, концентрация O<sub>2</sub> — 11 %).

Существенные проблемы связаны с охраной здоровья персонала, занятого подготовкой ТБО. Как отмечено специалистами, меры предосторожности по охране здоровья персонала, которые связаны с патогенными веществами и которые требуются при обработке рыхлых отходов, могут быть значительно ослаблены (или вообще не потребуются) при хранении и использовании брикетов, т. к. температура в них за счет аэробного разложения повышается очень быстро и достаточна для уничтожения большинства микроорганизмов.

Ежегодно в России образуется около 40 млн т бытовых отходов, однако из них в качестве энергетического топлива используется менее 1 %. В развитых странах сжигается основная часть образующихся ТБО: в Швейцарии — 80 %, в Дании — 80 %, в Японии — 85 %, во Франции — 65 %, в Германии — 60 %.

В 2004 г. введен в эксплуатацию московский СЗ № 4, в состав которого входят две турбины мощностью по 6 МВт (Калужский турбинный завод) и три технологические линии для сжигания твердых бытовых отходов (немецкая фирма «Хельтер»). В состав электростанции первой в России ТЭС, работающей на ТБО (1999–2000 гг.), входят три турбины

П-12—13/6 и три технологические линии для термической переработки ТБО [39]. Каждая линия укомплектована: паровым котлом со слоевым сжиганием отходов, позволяющим обеспечить необходимый режим для наиболее полной деструкции и окисления органических компонентов, что существенно снижает образование диоксинов, фуранов и монооксида углерода; многоступенчатой системой газоочистки с использованием карбамида, щелочного реагента и активированного угля.

В топку с обратноперегревающей решеткой подают ТБО, дозируемые непрерывно. Для их разогрева при пуске и поддержания необходимой температуры в топке (850—930 °С) используется подсветка природным газом. Отходы перемещаются от узла загрузки к шлаковой ванне непрерывно с помощью подвижных колосников. Первичный воздух подогревается в калорифере и направляется снизу под решетку. Для обеспечения полноты процесса сжигания в поток продуктов сгорания подается вторичный воздух.

Для снижения концентраций вредных веществ в дымовых газах в топку котла вводят карбамид и в мокросухой абсорбер смесь реагентов (активированного угля с щелочным сорбентом). Дополнительно дымовые газы очищаются от золы и от газообразных компонентов в рукавном фильтре.

Очищенные дымовые газы направляют дымососом в дымовую трубу. Выработываемый пар с параметрами:  $p = 1,6$  МПа,  $t = 240$  °С от всех трех линий поступает в общий паровой коллектор и далее в турбины.

Таким образом, используется двухступенчатое сжигание ТБО — первоначально на наклонноперегревающей решетке, а затем в вихревом кипящем слое. При этом обеспечиваются хорошее перемешивание материала слоя, длительное времяпребывание в топке частиц ТБО и полное выгорание углерода в отходах при низких (550—700 °С) температурах в слое. Избыток воздуха в слое поддерживается около единицы. Дожигание продуктов сгорания происходит в надслоевом пространстве, куда подают вторичный воздух, организующий вихревой процесс. В результате такого двухступенчатого сжигания уменьшается образование оксидов азота, концентрация которых в дымовых газах при нормальных условиях не превышает  $200 \text{ мг/м}^3$  (в пересчете на сухие газы и 11 % кислорода). Топочное устройство рассчитано на сжигание измельченных твердых бытовых отходов с расходом 13,5 т/ч при теплоте сгорания рабочей массы 6500 кДж/кг (максимальный размер отходов — не более 300 мм).

Институтом теплофизики СО РАН разработана технологическая схема комплексной районной тепловой станции, сжигающей горючие отходы и мусор и обеспечивающей при этом централизованное снабжение жилого района.

### **5.11.3. Организация сжигания биогаза, поступающего в виде свалочного газа**

Биогаз представляет собой смесь газов растительного и животного происхождения, которые образуются в результате разложения органических отходов в биореакторе без доступа воздуха. Биогаз обычно получают на специальных установках, построенных на канализационных и водоочистных сооружениях, в животноводческих хозяйствах. Для получения топлива требуется соблюдение температурного режима, поэтому часть тепловой энергии идет на подогрев биореактора [40].

Биогазовый комплекс включает в себя оборудование для подготовки сырья, метантенки анаэробного сбраживания со встроенными газгольдерами, когенерационную установку (электрическая мощность — 320 кВт, тепловая — 400 кВт), оборудование по очистке газа, резервуары для хранения органического удобрения, а также системы контроля и управления. Промышленное получение топлива на полигонах обычно осуществляется по следующей принципиальной схеме: сеть вертикальных газодренажных скважин, пронизывающих всю толщу накопленных отходов, соединяют линиями газопроводов, в которых компрессорная установка создает разрежение, необходимое для транспортировки газа до места использования.

Одним из источников организованного получения биогаза являются свалки твердых бытовых отходов, в которых осуществляется их захоронение в приповерхностной геологической среде. В этих условиях отходы подвергаются интенсивному биохимическому разложению, которое сопровождается выделением свалочного газа. Газогенерация свалки зависит от состава и объема мусора и может продолжаться более 100 лет. Время, в течение которого выделение газа уменьшается в два раза, может достигать 25 лет. При этом свалочный газ представляет собой реальную опасность в связи с риском возгорания или взрыва, а также отрицательным влиянием на здоровье персонала.

По составу биогаз отличается от природного газа составом — 50,7 % метана, 30,40 % балласта (в основном  $\text{CO}_2$ ), а также некоторых других веществ, среди которых имеется небольшое количество сероводорода

$\text{H}_2\text{S}$ ,  $Q_i' = 23 \text{ Мдж/м}^3$ . При сжигании биогаза полигонов влияние газов на парниковый эффект снижается в 8–10 раз, выбросы оксидов азота и показатели токсичности продуктов сгорания снижаются на 40–50 %.

Биогаз является эффективным энергетическим топливом. В США общая мощность энергоустановок на мусорных свалках составляет около 300 МВт. С 1996 г. эксплуатируется ТЭС *Hanes Mill* с газовой турбиной мощностью 4,3 МВт, обычно целиком работающей на биогазе. Реализация выработанной на биогазе электроэнергии связана в США со значительными налоговыми льготами. Использование биогаза в качестве топлива предполагает местный режим потребления, когда не требуется перекачка газа на большие расстояния.

При использовании биогаза в качестве топлива приходится сталкиваться со следующими основными трудностями [40]:

- 1) из-за высокого содержания  $\text{CO}_2$  снижается нормальная скорость распространения пламени и его устойчивость, сужаются пределы регулирования горелок;
- 2) из-за наличия сероводорода возникает проблема коррозии горелок, других элементов конструкции котла.

---

## Литература к разделу 5

---

1. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959.
2. Померанцев В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива. М. ; Л. : Машгиз, 1948.
3. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. М. : Энергоатомиздат, 1996.
4. Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. Энергия, 1973.
5. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб. : НПО ЦКТИ, 1996.
6. Померанцев В. В., Кацнельсон Б. Д., Шагалова С. Л. Физико-химические закономерности процесса горения натурального топлива. Доклад на 5-ю Мировую энергетическую конференцию. М. : Изд. комитета по участию СССР в международных энергетических объединениях, 1956.
7. Кацнельсон Б. Д., Мароне И. Я. Исследование воспламенения и горения мелких частиц твердого топлива. Горение твердого

- топлива // Материалы III Всесоюзной конференции : сб. статей. Новосибирск : Наука, 1969. С. 203–212.
8. Шагалова С. Л., Шницер И. Н. Сжигание твердого топлива в топках парогенераторов. Л. : Энергия, 1979.
  9. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220–100 / К. А. Григорьев [и др.] // Энергетик. 2009. № 1.
  10. Применение ВИР-технологии для обеспечения надежности сжигания березовского угля в котельных установках / Ф. З. Финкер [и др.] // Эксплуатация и модернизация энергоблоков мощностью 800 МВт. Шарыпово, 2002. С. 53–59.
  11. Проектирование топок с жидким шлакоудалением // Руководящие указания, дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов. М. : ВТИ, 1983.
  12. Маслов В. Е., Пугач Л. И. Сжигание кузнецких углей в топках с жидким шлакоудалением. М. : Энергия, 1972.
  13. Алехнович А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск : Цицеро, 2012.
  14. История энергетической техники СССР. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1957.
  15. Голышев Л. В., Синякевич Б. Г., Красноштан Н. Н. Особенности сжигания антрацитовых углей ухудшенного качества в котле ТПП-210 А // Энергетик. 1982. № 2.
  16. Проектирование топок с жидким шлакоудалением // Руководящие указания, дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов. М. : ВТИ, 1983.
  17. Котлер В. Р., Суловицкий В. Д. Опыт энергетиков ФРГ в борьбе с оксидами азота на котлах с жидким шлакоудалением // Энергохозяйство за рубежом. 1987. № 5.
  18. Циклонные топки/под. ред. Г. Ф. Кнорре, М. А. Наджарова. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958.
  19. Циклонные топки : перевод статей/под ред. М. А. Наджарова. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958.
  20. Белосельский Б. С., Барышев В. И. Низкосортные энергетические топлива : Особенности подготовки и сжигания. М. : Энергоатомиздат, 1989.
  21. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России/Г. А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. 2009. № 12.



22. Опыт сжигания углей и горючих отходов на экспериментальном промышленном котле УГТУ с циркулирующим слоем/А. П. Баскаков [и др.] // Сборник международной НПК «Экология энергетики — 2000». М., 18 сентября 2000 г.
23. Рапопорт В. Е., Минулин Р. С., Маратканова Л. В. Размол и сжигание экибастузского угля на крупных энергоблоках Рефтинской ГРЭС // Надежность и экономичность работы котельного оборудования при сжигании экибастузских углей : сб. статей. 1985.
24. Кузнецов Г. Н., Комягин В. Д. О расчете золового износа // Надежность и экономичность работы котельного оборудования при сжигании экибастузских углей : сб. статей. 1985.
25. Шницер И. Н., Авдеев И. А., Мовчан А. Т. Исследование процесса горения антрацитового штыба и его смеси с газом в топочной камере котла ТП-100 // Электрические станции. 1972. № 7.
26. Алехнович А. Н., Богомоллов В. В. Прогнозирование шлакующих и загрязняющих свойств углей // Электрические станции. 1998. № 4.
27. Шницер И. Н., Соловьев Л. К., Плаксин О. Т. Сжигание антрацита ухудшенного качества и смеси АШ с мазутом в топке котла ТПП-210 А // Электрические станции. 1983. № 8.
28. Мосин С. И., Морозов А. Г., Делягин Г. Н. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. 2008. № 9.
29. Матузов С. В. Сжигание кавитационного водоугольного топлива в низкотемпературном кипящем слое // Горение твердого топлива : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск : Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2012.
30. Иоффе В. М., Красавин Н. А., Бондарев А. М. Применение системы подачи пыли с высокой концентрацией на котлах ПК-40 // Электрические станции. 1984. № 3.
31. Казанский А. Н., Лисицин В. В., Пугач Л. И. Опыт эксплуатации систем высококонцентрированной подачи пыли к горелкам // Энергетик. 1983. № 11.
32. Шульман В. Л., Глазков В. К., Маратканова Л. В. Снижение выхода оксидов азота при переводе котла ТП-87 на сжигание высококонцентрированной аэросмеси // Электрические станции. 1988. № 2.

33. Елчина В. И. Изучение кинетики выгорания тонкоизмельченного полукокса // Горение твердого топлива : материалы II Всесоюзной конференции. Новосибирск, б.и, 1969.
34. Шульман В. Л., Паршуков В. С., Глазков В. К. Энергетическое использование нефтекокса // Теплоэнергетика. 2000. № 9.
35. Кирш К. В. Дрова как топливо. М. : [б. и.], 1919.
36. Силин В. Е., Рыжков А. Ф. Режимы низкотемпературного горения древесного топлива для современных энергоустановок // Теплоэнергетика. 2008. № 12.
37. Мадоян А. А. Маневренность и экологичность котлов с газификацией угля в шлаковом расплаве // Теплоэнергетика. 1999. № 11.
38. Тугов А. Н., Москвичев В. Ф., Рябов Г. А. Опыт сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС // Теплоэнергетика. 2006. № 7. С. 55–60.
39. Ланцев А. С., Промыслов В. В. Опыт работы мусоросжигательного завода № 2 г. Москвы // Новости теплоснабжения. 2010. № 11.
40. Чернин С. Я., Парубец Ю. С. Российский опыт внедрения биогазовых технологий для производства электрической и тепловой энергии // Новости теплоснабжения, 2011. № 8. С. 30–33.

---

## 6. ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТОПОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

### 6.1. Технологии «чистого» сжигания угля

---

**Р**азвитие топочно-горелочных устройств энергетических котлов при факельном сжигании шло в направлении интенсификации смесеобразования и улучшения выгорания топлива за счет турбулизации потоков реагентов — топлива и воздуха. Однако в современных условиях качество горелки и топочно-горелочного устройства в целом определяется эколого-экономической эффективностью — минимальным образованием в факеле токсичных веществ, в первую очередь оксидов азота  $\text{NO}_x$ . Соответственно, принципиально изменилась концепция систем сжигания энергетического топлива, в которой все более довлеют экологические факторы.

Снижение выброса оксидов азота в пылеугольном и газовом факелах достигается в современных горелочных устройствах замедленным смесеобразованием, затягиванием выгорания топлива. При этом для пылеугольного факела в связи с недостатком воздуха в начальном участке факела создаются условия для подавления «топливных» оксидов за счет термического разрушения связанного азота топлива и перевода его в молекулярный азот при недостатке окислителя.

В газовом факеле при замедленном смесеобразовании снижается максимальная температура факела и, соответственно, ограничивается окисление азота воздуха. Поэтому расчетный режим работы современной горелки (т. н. «экологически чистой»), структура факела смещаются от параметров, необходимых для оптимальных условий выгорания. Однако внедрение экологически ориентированных технологий сжигания энергетического топлива не должно приводить к снижению достигнутых технико-экономических показателей. Современное развитие систем сжигания энергетического топлива предусматривает компромисс двух этих неотъемлемых характеристик топочно-горелочных устройств. На практике он реализуется различными путями: использованием отдельных конструктивных, технологических и режимных мероприятий, воздействием на процессы подготовки топлива, организацию его сжигания с использованием способов снижения вредных выбросов превентивного и восстановительного характера.

Экологическое совершенствование сжигания энергетических углей не является изолированной проблемой, которую можно решать вне общей тенденции развития энергетики — экологически ориентированной трансформации технологии энергопроизводства. Она осуществляется по различным направлениям — рационализация термодинамического цикла, использование новых конструктивных материалов, новых технологий подготовки топлива к сжиганию, разработка и внедрение нового высокоэкономичного генерирующего оборудования.

Подвижность нормативной базы охраны окружающей среды, неблагоприятные изменения локальной экологической ситуации за время существования ТЭС определяют неизбежность неоднократного пересмотра отдельных технологических решений, замены части оборудования, чтобы постоянно оставаться на уровне современных экологических требований. Проблема может обостриться в будущем при согласовании законодательной базы с требованиями экологической безопасности стран Европейского Союза, без чего могут возникнуть ограничения доступа российской энергии и технологий на рынки этих стран. Эта задача может решаться путем постепенной интеграции элементов принципиально новых технологий в традиционные технологии энергетического использования органического топлива.

## **6.2. Банк мероприятий по экологическому совершенствованию топочного процесса в энергетике**

---

Обобщая освоенные на практике технологические и конструктивные решения, можно представить банк экологически ориентированных мероприятий, отработанных, пригодных к эксплуатации и дальнейшему внедрению:

- 1) мероприятия, реализуемые непосредственно в факеле:
  - а) воздействие на структуру факела:
    - направленное формирование пылеугольного факела с замедленным смесеобразованием путем рационализации воздушного режима горелки;
    - промежуточный ввод инертной газовой среды (рециркулирующие дымовые газы), разделяющей потоки первичного и вторичного воздуха;
    - управляемая неоднородность состава пылевоздушной смеси на выходе из горелки по периметру (дискретный ввод угольной пыли);
    - внедрение горелок с эффективными приемами управления структурой и круткой закрученных потоков или их отдельных зон;
    - разделение потоков воздуха с вводом части вторичного воздуха в отдаленные области факела с восстановительной газовой атмосферой;
    - уменьшение доли первичного (транспортирующего) воздуха при использовании высококонцентрированной аэросмеси (ПВК);
    - использование прямоточного факела с затянутым смесеобразованием, перемещением воспламенения и горения топливовоздушной смеси непосредственно в топочное пространство; здесь функции горелки ограничиваются вводом реагентов в топку;
    - рассредоточенный по высоте и по сечению топки ввод воздуха в результирующий факел с дефицитом кислорода;
  - б) изменение параметров и состава окислителя:
    - балластирование воздушного дутья с использованием в его составе инертной среды (рециркулирующие дымовые газы, водяной пар);
    - снижение температуры подогрева дутьевого воздуха;
    - изменение общего избытка воздуха, подаваемого в горелку;

в) пространственное разделение отдельных составляющих стадий процесса горения — выделения летучих и воспламенения, выгорания коксового остатка;

г) термическая обработка топлива перед подачей в топку — осуществление пиролиза угольных частиц в выносном аппарате с выделением азотсодержащих веществ, их преобразованием в бескислородной зоне;

2) технологические решения, используемые непосредственно в топочной камере для управления процессами образования оксидов азота:

е) нестехиометрическое сжигание — варианты ступенчатого сжигания:

- чередование горелок с отклонением избытка воздуха в разные стороны от расчетного значения, с уменьшенным выходом оксидов азота в зонах отклонения;

- сниженный избыток воздуха в горелках одного яруса, с соответствующим увеличением подачи воздуха на остальные яруса горелок;

- ввод части вторичного воздуха в топку помимо горелок с помощью заднего дутья, отдельных воздушных шлицев вблизи горелок; нижнего дутья;

- пространственное разделение отдельных стадий процесса горения на стадии с разным уровнем дефицита кислорода для целенаправленного подавления образования топливных, быстрых и термических оксидов азота;

ж) вихревая аэродинамическая структура топочных газов в режиме низкотемпературного сжигания:

- система плоских вертикальных вихрей (НТВ-, ВИР-технологии и другие варианты);

з) формирование единого спирального вихревого факела, формируемого прямоточными вводами отдельных горелок:

- тангенциальные топки с угловыми, тангенциальными горелками, в которых воспламенение и стабилизация факела осуществляются при поступлении прямоточных струй топливо-воздушной смеси от горелок в центральный вихрь; до этого на прямоточном участке индивидуальных факелов происходит термообработка угольной пыли и подавление оксидов азота;

- кольцевая топка, в которой прямоточные горелки ориентированы по касательной к среднему диаметру кольцевого топочного пространства;

3) организация рабочего процесса в малотоксичной камере сгорания ГТУ:

- и) направленное формирование структуры газового факела:
  - двухзонная камера с диффузионным сжиганием газообразного топлива;
  - двухзонная камера сжигания с микрофакельным сжиганием;
  - использование заранее подготовленной топливовоздушной смеси для ведения режима кинетического горения с минимальным выходом оксидов азота;
  - комбинация режимов диффузионного и кинетического горения;
- к) подготовка угля для использования в газотурбинном цикле:
  - газификация угля для сжигания полученного синтез-газа в камере сгорания ГТУ;
  - пиролиз угля для использования продуктов пиролиза при подогреве циклового воздуха в паровоздушном котле и догреве его впрыском струй пиролизного газа в поток высоконагретого воздуха;
  - микропомол угольной пыли с предварительным обогащением угля для использования продуктов сгорания угольной пыли в качестве рабочего тела в ГТУ.

Необходимо отметить некоторые условия выбора и реализации решений, приемлемых для конкретного объекта.

1. В совершенствовании технологии сжигания энергетических топлив приоритетной задачей является ограничение выбросов тех токсичных веществ, образование которых в процессе сжигания зависит от способа ведения топочного процесса — оксиды азота, углерода, бенз(а)пирен.

2. Для конкретных пылеугольных котлов создание и внедрение действительно работоспособной и эффективной технологии подавления вредных выбросов завершается на реальном котлоагрегате в результате доводочных работ. Изначально, исходя только из опыта, теоретических исследований, рекламной информации, невозможно без учета эксплуатационного состояния конкретного котла гарантировать автоматическое воспроизведение экологического эффекта.

3. Использование комплекса мероприятий по подавлению оксидов азота в процессе сжигания (схема трехступенчатого сжигания, концентрическая подача воздуха в топку в основной зоне горения,



малотоксичные горелки, нижнее дутье) требует взвешенного подхода. Необходимо учитывать, что итоговый экологический эффект одновременного воздействия разнородных мероприятий не сводится к простому сложению эффективности автономного воздействия каждого из них.

4. При выборе и реализации каждого отдельного экологически ориентированного мероприятия необходимо оценивать и учитывать возможные побочные последствия по экономичности и надежности оборудования.

### **6.3. Организация внутритопочных процессов ограничения вредных выбросов**

---

Внутритопочные мероприятия охватывают весь объем топочной камеры, они связаны с регулированием физико-химических, аэродинамических, теплообменных процессов в огромных по массе потоках топливо-воздушной смеси, высокотемпературных дымовых газов в обширном объеме топочной камеры. Среди них можно выделить:

- превентивные (предупреждающие образование оксидов азота и ряда других загрязнителей) — стехиометрическое и ступенчатое сжигание; рециркуляция дымовых газов; интенсификация теплоотвода от факела размещением дополнительных экранных поверхностей нагрева; организация центрального вихревого потока в топке — концентрическая система сжигания с тангенциальной установкой прямоточных горелок; снижение общего избытка воздуха в топке; предотвращение загрязнения и шлакования поверхностей нагрева;

- восстановительные (непосредственно не влияют на образование оксидов азота, осуществляют подавление уже образовавшихся оксидов восстановлением) — организация трехступенчатого сжигания, введение присадок — аммиака, карбомида — непосредственно в топочной камере или на выходе из нее.

#### **6.3.1. Нестехиометрическое сжигание**

Нестехиометрическое сжигание выделяется как отдельное направление в ограничении выбросов оксидов азота, хотя этот

принцип сжигания топлива с нерасчетным избытком воздуха используется в различных технологиях подавления оксидов азота. Нестехиометрическое сжигание реализуется за счет создания в объеме топочной камеры восстановительной ( $\alpha < 1$ ) и окислительной ( $\alpha > 1,2+1,25$ ) зон горения при расчетном избытке воздуха на выходе из топки. В восстановительной зоне происходит подавление образования термических и топливных оксидов азота из-за недостатка кислорода, а в окислительной зоне образование термических  $\text{NO}_x$  сдерживается в результате снижения температуры за счет больших избыточных объемов воздуха. При нестехиометрическом сжигании поддерживается соответствующий (сниженный либо увеличенный) общий избыток воздуха в факелах отдельных горелок или групп горелок на всем протяжении процесса горения. В отличие от этого при ступенчатом сжигании нерасчетный избыток воздуха складывается только в начальном участке факела каждой отдельной горелки с подводом необходимого воздуха на последующем участке зоны горения [1].

### 6.3.2. Ступенчатое сжигание

При двухступенчатом сжигании часть воздуха (0,15–0,3 от теоретически необходимого для сжигания) подается в виде третичного дутья выше зоны активного горения через специальные сопла. Эти сопла могут устанавливаться также и в горизонтальной плоскости на уровне установки пылеугольных горелок. За счет уменьшения концентрации кислорода в зоне активного горения формируется восстановительная среда, способствующая замедлению образования  $\text{NO}_x$  и восстановлению до  $\text{N}_2$  образовавшихся оксидов азота. Выход оксидов азота снижается в среднем на 25 % [2].

Двухступенчатое сжигание предусматривает:

- формирование и размежевание по горизонтали или по вертикали зон горения с различным избытком воздуха путем чередования горелок с пониженным и повышенным избытком воздуха (относительно расчетного значения);
- сброс в топку части воздуха (третичный воздух) помимо горелок выше горелочного пояса. По этой схеме зарубежными фирмами осуществляется ступенчатое сжигание в большинстве топочных устройств (рис. 6.1).

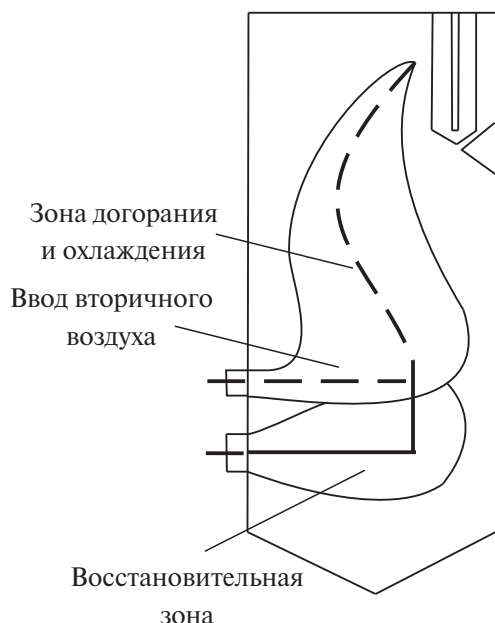


Рис. 6.1. Схема организации двухступенчатого сжигания

Условием эффективности ступенчатого сжигания с третичным дутьем является:

- поддержание оптимального избытка первичного воздуха, соответствующего выходу летучих и исключающего повышенный локальный избыток воздуха в факеле (доля третичного дутья — 10–15 %);
- достаточное расстояние по высоте между основными горелками и соплами третичного дутья, позволяющее предотвратить преждевременное подмешивание третичного воздуха к восходящему факелу; в ряде случаев сопла третичного воздуха размещаются почти на выходе из топки. При таком предельно верхнем положении сопел третичного дутья необходимо предотвратить повышенный недожог угольных частиц. Поэтому в зоне ввода третичного дутья важно организовать эффективное смешение воздуха с восходящим потоком дымовых газов. Для этого используется дополнительный дутьевой вентилятор, который обеспечит дальнобойность воздушных струй и необходимую энергию смешения (бустерная система ступенчатого сжигания);

— при использовании топлива с малым выходом летучих необходимо затормозить смешение вторичного воздуха с аэросмесью в основном факеле, переместить догорание части летучих в зону третичного дутья, где эти летучие будут инициировать догорание продуктов неполного горения из основного факела.

Таким образом, воспламенение и сгорание основной части топлива осуществляется в среде с недостатком кислорода (обычно при локальном избытке воздуха 0,8–0,95).

Эффективность двухступенчатого сжигания определяется четким размежеванием основного факела и зоны дожигания без их наложения.

Ряд фирм использует дополнительные способы ввода третичного воздуха вдоль боковых стенок топки на уровне горелочного пояса или ниже его, организуя воздушную завесу для предупреждения коррозии экранных труб и снижения химического недожога в периферийных слоях топочных газов.

Следует учитывать возможность формирования коррозионноопасных участков в зонах с восстановительной средой. В условиях недостатка кислорода и при наличии недожога у экранных поверхностей нагрева в ряде случаев (в частности, при сжигании канско-ачинских углей) наблюдается интенсивное образование прочных первичных железосодержащих отложений (с содержанием оксидов железа до 80 %).

При увеличении доли нижнего дутья (регулирование поворотным шибером на подводе воздуха к нижним шлицам) от 0 до 45 % концентрация оксидов азота уменьшается соответственно с 850 до 440 мг/м<sup>3</sup>. При этом избыток воздуха в горелках снижался соответственно от 1,15 до 0,65. Использование верхнего дутья привело к большему снижению концентрации NO<sub>x</sub>. Различное влияние систем нижнего и верхнего дутья на эмиссию NO<sub>x</sub> объясняется тем, что при нижнем дутье «отнятая» у горелок часть воздуха затем снова возвращается в зону горения, на выходе из которой  $\alpha = 1,0–1,1$ .

Следует отметить, что при этом система нижнего дутья выполняет и такие важные функции, как устранение шлакования холодной воронки, резкое уменьшение провала (механического недожога) и снижение температуры газов на выходе из топки [2].

Один из способов реализации двухступенчатого сжигания выполнен на котлах БКЗ-160–100, предназначенных для сжигания азейского бурого угля, в двух вариантах — с применением нижнего или верхнего дутья (рис. 6.2).

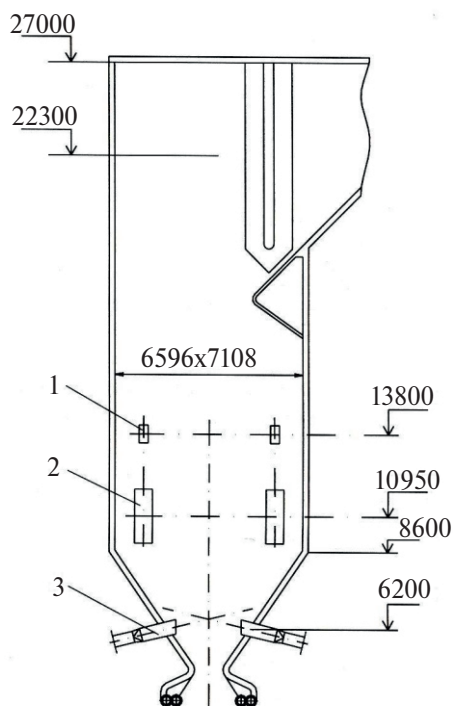


Рис. 6.2 Схема топки котла БКЗ-160—100:

1 — сопла верхнего дутья, 2 — горелки, 3 — сопла нижнего дутья

ОАО «Подольский машиностроительный завод» совместно с ЗАО «ЗиО-КОТЭС» разработал проект реконструкции котельной установки с котлом типа П-57—3 М ст. № 2 Экибастузской ГРЭС-1 с переводом его на двухступенчатое сжигание (рис. 6.2) [3]. Проектным топливом является высокосольный нешлакующий экибастузский каменный уголь ( $A^r$  до 45 %,  $W^r = 5-9$  %,  $V^{daf} = 31-33$  %,  $Q_i^r = 15920-16760$  кДж/кг). Высокая забаластированность пылевоздушной смеси золой топлива значительно увеличивает время прогрева горючей части топлива, затягивает и ухудшает стабильность горения на пониженных нагрузках и требует наличия в ядре факела достаточно высоких температур для достижения хороших показателей по выгоранию топлива.

Топка оборудована 24 вихревыми низкоэмиссионными пылеугольными горелками, расположенными на боковых стенах в два яруса по встречной схеме. Над горелками основных ярусов устанавливается восемь сбросных горелок, расположенных по тангенциальной схеме таким образом, что в каждой полутопке организуется вихре-

вое движение (симметричное относительно оси котла) пылевоздушной смеси.

Горелка имеет один центральный канал и четыре концентрических кольцевых канала (рис. 6.3). В первый (внутренний) кольцевой канал горелки с осевым завихрителем, обеспечивающим смешивание воздуха с распыленным мазутом, подается часть вторичного воздуха для воспламенения мазута при растопке котла. При работе на пылевоздушной смеси в этот канал подается воздух, необходимый для охлаждения.

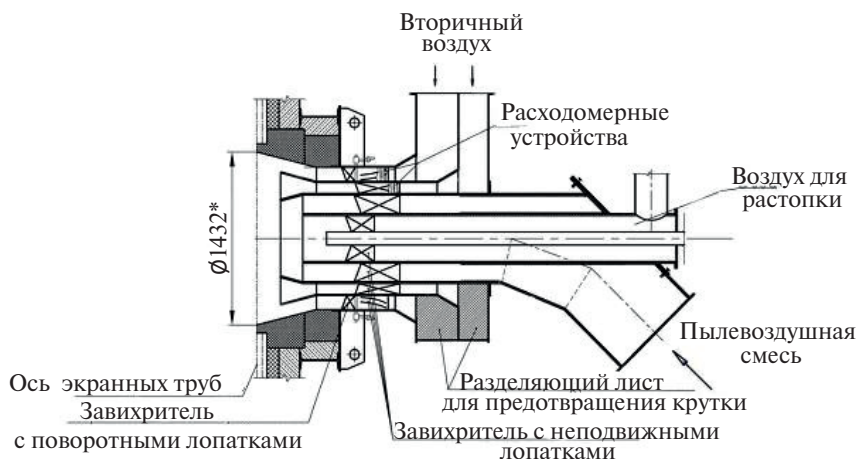


Рис. 6.3. Конструкция низкоэмиссионной горелки

В выходной части канала аэросмеси установлен нерегулируемый аксиальный лопаточный завихритель с малой круткой, а сама выходная часть выполняется в форме конфузора для повышения концентрации пыли в зоне воспламенения. В корне факела за счет наличия крутки потоков, истекающих из кольцевых каналов горелки, образуется зона активной рециркуляции горячих топочных газов (зона «обратных токов»). В результате происходит быстрый прогрев аэросмеси, а недостаток кислорода в этой зоне позволяет снизить образование топливных оксидов азота, составляющих значительную часть эмиссии  $\text{NO}_x$ . Канал вторичного воздуха разбит на два кольцевых потока с регулируемыми и нерегулируемыми завихрителями. Наружный канал имеет большую величину крутки, в результате часть воздуха отрывается от основного потока

на начальном участке факела в зоне выхода и воспламенения летучих, за счет чего организуется горизонтальная стадийность горения топлива.

Аналитические исследования показали возможность достижения требуемого уровня выбросов  $\text{NO}_x \leq 600 \text{ мг/нм}^3$  при приемлемом значении механического недожога ( $q_4 \leq 2,5\%$ ) при сжигании высокозольного экибастузского угля.

### 6.3.3. Ограничение образования оксидов азота при концентрическом сжигании

В концентрическом методе сжигания углей сочетаются ступенчатость топочного процесса по вертикали (за счет ввода части воздуха выше горелочного пояса или неравномерно по высоте блока горелок) и ступенчатость по горизонтали. Горизонтальная ступенчатость реализуется за счет отклонения части потока вторичного воздуха от струи аэросмеси в тангенциальной топочной камере (рис. 6.4). Направление определенной части воздуха между осью горелок и топочным экраном создает градиент концентраций в горизонтальном сечении топки. В результате в приосевой части топочной камеры складывается повышенная концентрация топлива, а на периферии — повышенная концентрация окислителя. Экологическая эффективность концентрического сжигания высока. Снижение выхода оксидов азота достигает 70%. Дополнительный эффект при этом создает уменьшение шлакования поверхностей нагрева и коррозии экранных труб.

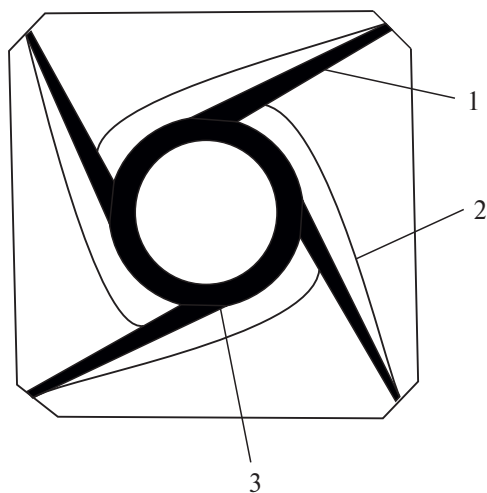


Рис. 6.4. Схема концентрического сжигания:

- 1 — поток первичного воздуха с угольной пылью; 2 — вторичный воздух;  
3 — зона, обогащенная топливом



### 6.3.4. Пониженный общий избыток воздуха в топке

Минимизация избытка воздуха в топке всегда рассматривалась как способ повышения экономической и экологической эффективности топочного процесса, а также ограничения низкотемпературной серно-кислотной коррозии поверхностей нагрева. При этом учитываются такие ограничивающие факторы, как шлакование, неполнота сгорания топлива, а также обеспечение расчетных параметров пара.

Зависимость выхода  $\text{NO}_x$  от избытка воздуха в факеле имеет экстремальный характер. Значение экстремального коэффициента избытка воздуха, соответствующего наибольшему выходу оксидов азота, зависит от вида топлива, способа организации и структуры факела. При  $\alpha < \alpha_{\text{кр}}$  увеличение концентрации в аэросмеси свободного кислорода способствует интенсификации окисления азота воздуха, возрастанию равновесной концентрации; при  $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$  более существенным становится снижение максимальной температуры факела за счет охлаждения его ядра избыточным воздухом. При кинетическом горении (сжигание идеально перемешанных смесей топлива и воздуха)  $\alpha_{\text{кр}} = 1,0$ ; в диффузионном факеле по мере ухудшения смесеобразования значение  $\alpha_{\text{кр}}$  возрастает.

При сжигании серосодержащего топлива входящая в его состав сера претерпевает сложные превращения, переходя в конечном счете в диоксид серы  $\text{SO}_2$  и лишь в небольшой степени в  $\text{SO}_3$ . По данным А. К. Внукова, при избытке воздуха  $\alpha = 1$  и температуре в топочной камере в диапазоне 500–2000 °К вся сера содержится в дымовых газах в форме диоксида серы  $\text{SO}_2$ . При  $\alpha > 1,0$  равновесие смещается в направлении образования соединений высшей валентности  $\text{SO}_3$  по реакции:



Снижение избытка воздуха при сжигании мазута до  $\alpha = 1,01–1,02$  заметно уменьшает содержание  $\text{SO}_3$ . Благодаря этому точка росы дымовых газов приближается к точке росы водяных паров, т. е. к 50–60 °С, и скорость коррозии снижается в несколько раз.

Приемлемый по условиям эксплуатации режим работы котла (бесшлаковочный режим, отсутствие интенсивной сернистой и серно-кислотной коррозии, допустимый недожог — механический и химический, затраты энергии на собственные нужды, а также соответствие экологическим нормативам) определяется испытаниями котла. Сни-

жение избытка воздуха в топках, изначально не предназначенных для эксплуатации в таком режиме, приводит к снижению температуры топочных газов на выходе из топки, уменьшению температуры пара. Для предотвращения этого побочного эффекта уменьшения избытка воздуха осуществляется рециркуляция дымовых газов.

### **6.3.5. Пониженный температурный уровень топочного процесса**

Снижение температуры в топочной камере достигается размещением в топке дополнительных поверхностей нагрева (двусветных экранов, радиационного пароперегревателя), снижением температуры дутьевого воздуха, забалластированием воздуха инертными дымовыми газами, переходом на низкотемпературный топочный режим — НТВ, ЦКС [4; 5].

## **6.4. Восстановительные методы подавления оксидов азота**

---

### **6.4.1. Трехступенчатое сжигание твердого топлива**

Трехступенчатое сжигание является одним из наиболее эффективных технологических методов подавления оксидов азота, образующихся при сжигании в топке энергетического котла органического топлива. В отличие от других известных технологических методов воздействия на выход оксидов азота, носящих превентивный характер и предотвращающих окисление азота в высокотемпературной зоне, трехступенчатое сжигание обеспечивает восстановление оксидов азота, образовавшихся в факеле, до молекулярного азота. Этот процесс реализуется путем формирования в топочной камере трех последовательно расположенных рабочих зон (рис. 6.5):

- основной факел, в котором при расчетном избытке воздуха сжигается основная масса топлива (около 80 %), время пребывания в восстановительной зоне не менее 0,4–0,5 с;
- восстановительная зона, в которой при пониженном избытке воздуха ( $\alpha \approx 0,9$ ) обеспечивается образование восстановительной среды — продукты неполного горения, включающие промежуточные высокоактивные неустойчивые продукты горения — обрывки реакцион-

ных цепей, углеводородные радикалы, а также стабильные продукты неполного горения — водород, оксид углерода;

— зона дожигания, в которой обеспечивается выгорание продуктов неполного горения, поступающих из восстановительной зоны.

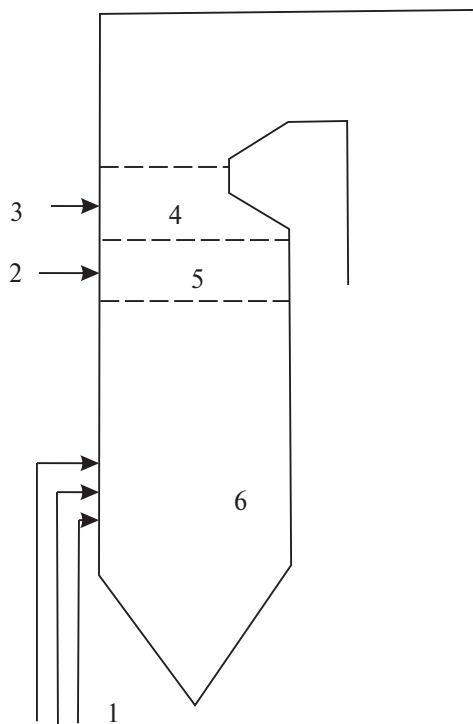


Рис. 6.5. Схема трехступенчатого сжигания:

1 — основное топливо и первичный воздух, 2 — топливо для получения восстановительной среды, 3 — третичный воздух, 4 — зона дожигания, 5 —восстановительная зона, 6 — основная зона горения

Химические превращения соединений азота топлива и воздуха в процессе трехступенчатого сжигания показаны на рис. 6.6. Химический процесс конверсии  $\text{NO}_x$ , образовавшегося в основной зоне горения, в молекулярный азот протекает через серию реакций с топливными радикалами в восстановительной зоне, обогащенной топливом. Углеводородные радикалы, которые образуются в восстановительной зоне, реагируют с частью поступающих в эту зону оксидов азота, образуя ряд промежуточных радикалов — цианид водорода  $\text{HCN}$ , изоциановую кислоту  $\text{HNCO}$  и другие. Взаимодействуя с аминами и окси-

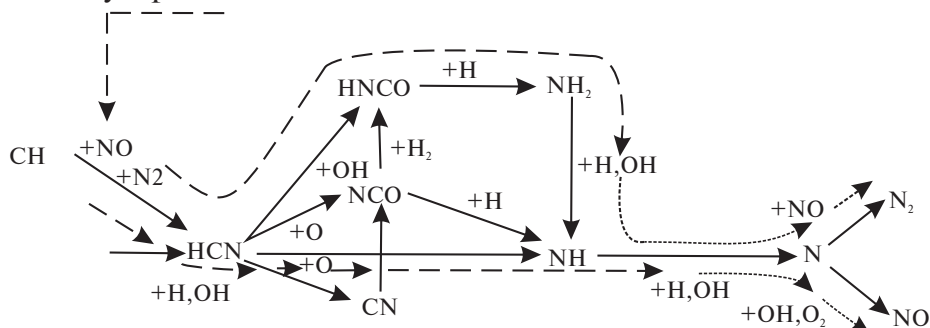


Рис. 6.6. Схема химических превращений при сжигании азотсодержащего топлива и при наличии зоны с восстановительной средой [2]:

-----> — окислительная среда (образование NO);

-----> — восстановительная среда (деструкция NO)

### Организация восстановительной зоны

Организация восстановительной зоны осуществляется вводом в топку переобогащенной топливо-воздушной смеси с восстановительной средой. Для этого необходимо прежде всего *равномерное распределение в сечении топочной камеры восстановительной среды* и дожигающего воздуха, наиболее полное перемешивание их с восходящим потоком дымовых газов на возможно более коротком участке движения дымовых газов.

В системах трехступенчатого сжигания ввод сред в восстановительную и дожигательную зоны организуется в большинстве случаев в виде ряда поперечных потоков (струй), вводимых с одной стенки либо противоположных стенок топочной камеры. Экологическая (выход оксидов азота) и экономическая (полнота выгорания) эффективность трехступенчатого сжигания определяется в решающей мере тем, насколько удастся решить аэродинамическую задачу — равномерного распределения струй в поперечном потоке и интенсивного их размытия. Подробнее этот вопрос рассмотрен в подразделе 11.10.

Эффективность восстановительных процессов обеспечивается выделением для развития процессов (образования восстановительной среды, химических реакций восстановления оксидов азота, выравнивания состава смеси дымовых газов и вводимых сред, дожигания продуктов неполного горения) соответствующего участка топочной

камеры необходимой высоты. Высотные размеры топок энергетических котлов создают хорошие условия для такого зонирования. Существенно влияет также и значение избытка воздуха в зоне восстановления.

Показательны также данные по выходу закиси азота  $N_2O$  (основной «тепличный» газ) при различном времени пребывания  $\tau_b$  топочных газов в восстановительной зоне (рис. 6.7). Эмиссия  $N_2O$  для  $\tau_b$ , меньших 160 мс, мало отличается от значений, полученных при традиционном сжигании угля без использования метода трехступенчатого сжигания. Увеличение времени пребывания в зоне восстановления до 910 мс приводит к росту уровня  $N_2O$ . Тем не менее образующаяся концентрация остается меньше  $10 \text{ млн}^{-1}$  во всех опытах. Как видно из графика (рис. 6.8), при фиксированной высоте топочной камеры и фиксированном суммарном времени пребывания топочных газов степень выгорания топлива и степень восстановления оксидов азота разнонаправленно изменяются по мере изменения времени пребывания газов  $\tau_b$  в зоне восстановления от 160 до 910 мс. При  $\tau_b < 380$  мс наблюдается снижение эффективности процесса восстановления  $NO_x$  при одновременном улучшении условий выгорания угля. С другой стороны, длительное время пребывания (более 550 мс) приводит к ухудшению выгорания, с недожогом не более 0,5–0,6 %.

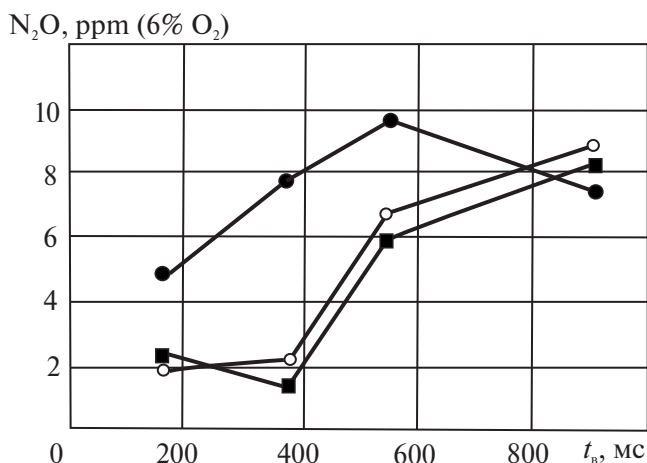


Рис. 6.7. Эмиссия  $N_2O$  в зависимости от времени пребывания в зоне восстановления (данные фирмы *ENEL*, Италия):

- —  $\alpha_1 = 1,03, \alpha_2 = 0,80$ ; ○ —  $\alpha_1 = 1,09, \alpha_2 = 0,87$ , ■ —  $\alpha_1 = 1,09, \alpha_2 = 0,95$

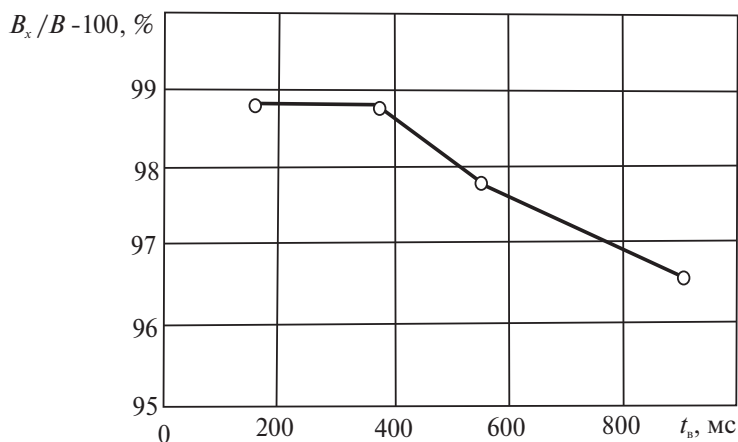


Рис. 6.8. Степень выгорания угля в зависимости от времени пребывания в зоне восстановления

### *Генерирование восстановительной среды*

Природный газ является наиболее эффективным топливом для формирования зоны восстановления. При использовании природного газа для генерации восстановительной среды следует учитывать, что устройства для ввода природного газа в восстановительную зону не являются горелочными устройствами [6]. Поэтому они не требуют специальной аттестации, на них не распространяются требования «Правил безопасности в газовом хозяйстве» как на элемент газопровода котла [4].

Природный газ является дорогим, а в некоторых регионах и дефицитным топливом, поэтому стремятся применять для формирования восстановительной среды другие виды топлива, в том числе и основное топливо. В зарубежных разработках до недавнего времени одной из важных задач в оптимизации трехступенчатого сжигания твердого топлива считалось уменьшение расхода природного газа, используемого для генерации восстановительной среды, до 5–10 % от общего расхода топлива на котел. В отечественных же реализованных разработках преобладают схемы трехступенчатого сжигания с получением восстановительной среды за счет сжигания основного топлива — угля — без специальной подготовки (сверхтонкое измельчение, получение синтез-газа и др.) при недостатке воздуха и без применения высококалорийного топлива — природного газа (работы УралОРГРЭС — 1990–1995 гг.). Этот принцип позволяет применять такую систему сжигания твердого топлива на ТЭС, не располагающих природным газом. При этом достигаемый эффект на российских ТЭС (снижение концентрации оксидов азота в дымовых газах составля-

ет не менее 40–50 %, в приведении к стандартному содержанию кислорода 6 % соответственно 350–500 мг/нм<sup>3</sup>) совпадает с результатами, получаемыми на ряде ТЭС США в режиме трехступенчатого сжигания угля с использованием в качестве вспомогательного топлива природного газа.

Отвод части угольной пыли в зону восстановления осуществляется различными путями. На котлах типа ПК-14 (экибастузский уголь) с пылесистемами прямого вдувания подача топлива для генерации восстановительной среды организована установкой пыледелителя центробежного типа на общем отводящем пылепроводе от сепаратора мельниц (рис. 6.9). Основная часть аэросмеси (до 80 %) с наиболее крупными частицами пыли ( $R_{90} = 20\text{--}21\%$ ) отводится в нижнюю горелку с расчетным избытком воздуха 1,1–1,15, остальная аэросмесь (без вторичного воздуха) с наиболее мелкими частицами пыли ( $R_{90} = 0\%$ ) отводится к верхней горелке, которая формирует восстановительную среду. Воздух на дожигание подается в топку над верхней горелкой. Установлено снижение выхода оксидов азота до 450–460 мг/нм<sup>3</sup> (на 50 % относительно исходной величины), при этом зафиксировано увеличение потерь теплоты с механическим недожогом не более 0,5–0,6 %. Такой же пыледелитель использован на котле БКЗ-420–140 (экибастузский уголь) (рис. 6.10).

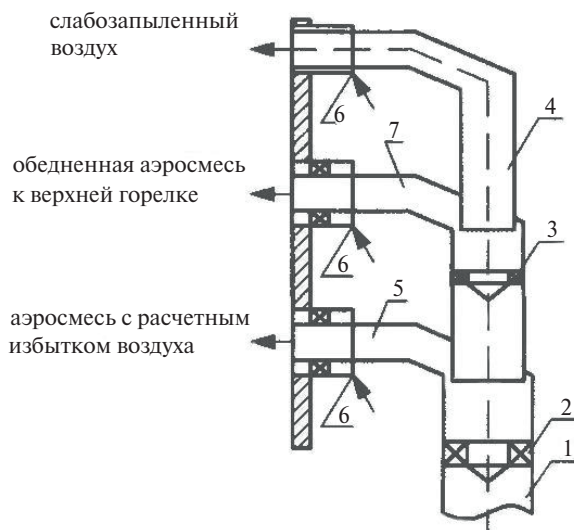


Рис. 6.9. Пыледелитель центробежного типа в системе трехступенчатого сжигания:

- 1 — канал аэросмеси от мельницы, 2 — завихритель лопаточный первый, 3 — завихритель лопаточный второй, 4 — патрубок отвода обеспыленного воздуха в дожигательную зону, 5 — отвод аэросмеси расчетного состава к горелке, 6 — ввод транспортирующей среды, 7 — отвод обогащенной аэросмеси



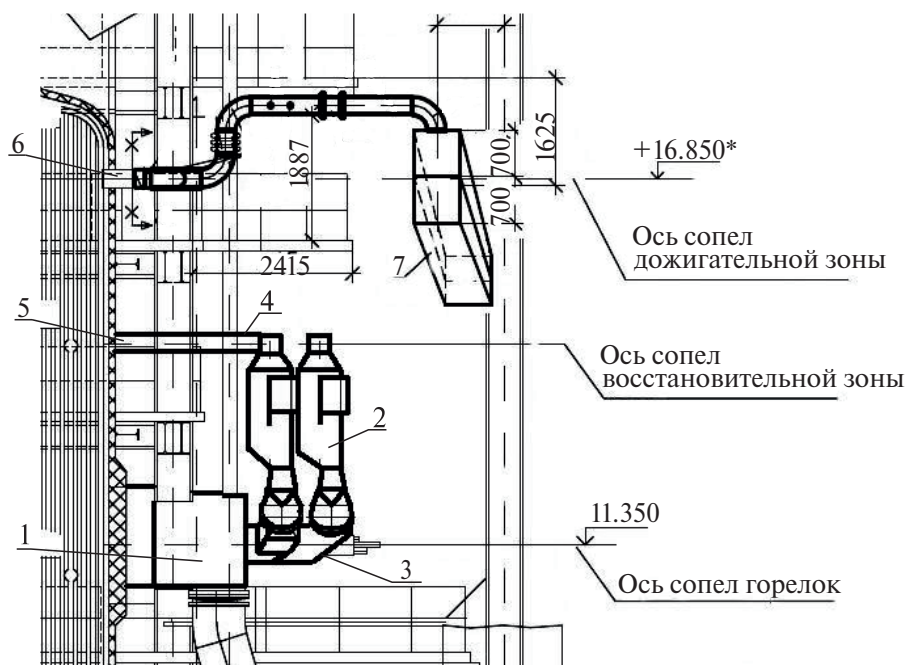


Рис. 6.10. Схема организации трехступенчатого сжигания на котле БКЗ-420–140:

1 — горелка, 2 — пыледелитель, 3 — пылепровод к горелке, 4 — пылепровод в восстановительную зону, 5 — сопло восстановительной зоны, 6 — сопло дожигательной зоны, 7 — короб горячего воздуха к дожигательной зоне

Для котлов типа ПК-10Ш с открытой амбразурой (рис. 6.11), сжигающих челябинский бурый уголь, найдено оригинальное решение — часть наиболее концентрированного потока аэросмеси через потолок шахты отводится в топку и используется для формирования восстановительной среды [7].

Реализация системы трехступенчатого сжигания значительно упрощается при использовании высококонцентрированной аэросмеси — ПВК (пыль высокой концентрации). При этом для заглубления струи ПВК и равномерного ее распределения по сечению топки осуществляется ввод в сопла восстановительной среды рециркулирующих дымовых газов, транспортирующих ПВК в топку.

Для создания восстановительной зоны применяют также уголь тонкого и сверхтонкого размола.

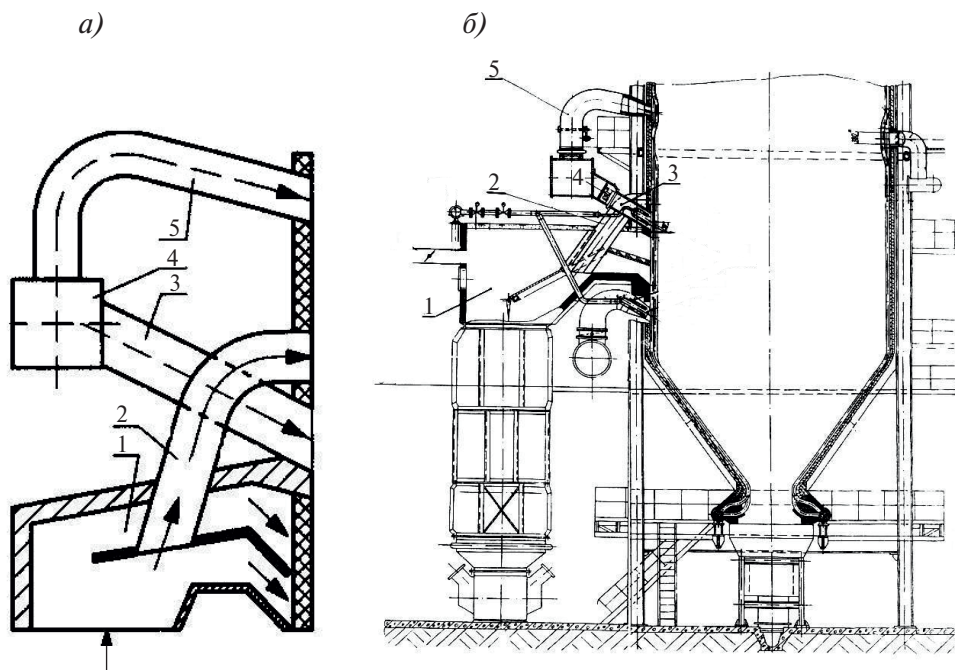


Рис. 6.11. Котел ПК-10Ш с шахтно-мельничной топкой с открытой амбразурой (Южуральская ГРЭС), переоборудованной для трехступенчатого сжигания:

а) общая схема трехступенчатого сжигания; б) схема отвода аэросмеси с повышенным содержанием угольной пыли из шахты на восстановительную зону:

1 — основной проток аэросмеси, 2 — отводящий патрубок аэросмеси в восстановительную зону, 3 — патрубок подвода воздуха к основному факелу, 4 — короб вторичного воздуха, 5 — патрубок подвода воздуха на дожигание

В определенных условиях оптимальным решением трехступенчатого сжигания при наличии пылесистемы прямого вдувания может служить использование природного газа для получения восстановительной среды. Для котла ТПЕ-214 реализована комбинированная схема формирования восстановительной среды при организации трехступенчатого сжигания (рис. 6.12). При двухъярусной компоновке основных горелок избыток воздуха в верхнем ярусе поддерживается на уровне  $\alpha = 0,7$ . Образующиеся здесь продукты неполного горения служат восстановительной средой для оксидов азота, генерируемых в первом ярусе горелок. Одновременно с этим в топку через газовые горелки над основными горелками поступает природный газ (10 % от общего расхода топлива на котел по теплу) в смеси с газами рециркуляции, ко-

торые обеспечивают достаточную дальнобойность восстановительной среды и равномерное распределение ее по сечению топки.

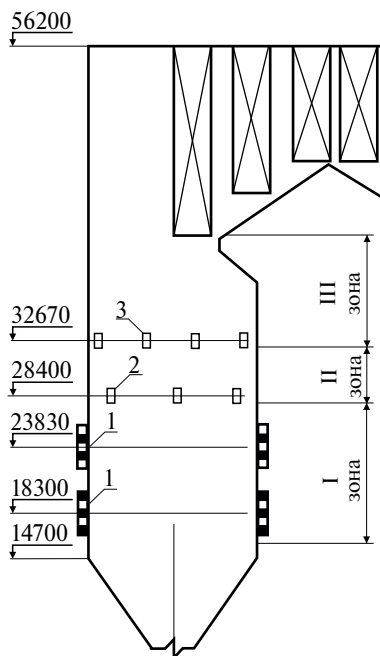


Рис. 6.12. Расположение горелок и сопел в топочной камере котла ТПЕ-214 Новосибирской ТЭЦ-5:

1 — основные пылеугольные горелки, 2 — газовые горелки,  
3 — сопла третичного дутья

Многообразие способов реализации системы трехступенчатого сжигания подтверждает опыт зарубежной энергетики. В США метод трехступенчатого сжигания угля с использованием газа реализован на котлах:

- с тангенциальной топкой, с тремя ярусами наклонных горелок;
- с циклонными предтопками, продукты сгорания из которых поступают в общую топочную камеру;
- с фронтальным расположением горелок с разделительным экраном.

В ряде случаев при организации трехступенчатого сжигания проявлялись побочные негативные последствия — достижение экологического эффекта сопровождалось в ряде случаев нарушением надежности работы поверхностей нагрева, отклонением от расчетных параметров пара, возрастанием механического недожога. Это подчеркивает необходимость тщательного анализа всех последствий намеча-

емой реконструкции, выполнения тепловых расчетов котла в режиме трехступенчатого сжигания. Так, при организации трехступенчатого сжигания на котле ТПЕ-214 при работе четырех пылесистем и оптимальном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha''_{\text{эк}} = 1,20$  на номинальной нагрузке (кузнечные угли марок Г и Д) были зафиксированы изменения технико-экономических показателей (табл. 6.1).

Таблица 6.1

**Тепловые потери и КПД brutto котла ТПЕ-214 при номинальной нагрузке  
(на кузнечных углях марок Г и Д)**

Показатели работы	Исходная организация топочного процесса	Режим трехступенчатого сжигания
Потери с уходящими газами $q_2$ , %	6,7	7,0
Потери с мехнедожогом $q_4$ , %	0,5	1,1
КПД brutto $\eta_k^{\text{бр}}$ , %	92,4	91,6

Сжигание угля по новой схеме не повлекло за собой усложнения эксплуатации и не привело к снижению надежности оборудования; опасения эксплуатационного персонала по этому поводу не подтвердились. По имеющимся данным, на котлах, переведенных на новую схему сжигания, не возникали и проблемы с коррозией или с температурой перегрева пара.

#### 6.4.2. Аммианирование дымовых газов

Восстановительные процессы в топке, направленные на снижение выбросов оксидов азота, реализуются не только в режиме трехступенчатого сжигания, но также и путем ввода в топочную камеру соединений аммиака.

Процессы селективного некаталитического восстановления оксидов азота (СНКВ) основаны на избирательном взаимодействии оксидов азота с аминоксодержащими восстановителями в газовой фазе:



В качестве восстановителей оксидов азота используются, как правило, аммиак или карбамид. Оптимальный температурный диапазон

восстановления NO составляет 900—1100 °С при использовании в качестве восстановителя как аммиака, так и карбамида с некоторым расширением «температурного окна» в случае использования карбамида. Время реакции, необходимое для завершения процесса восстановления NO<sub>x</sub>, составляет 0,4—0,5 с в зависимости от температуры. При увеличении времени концентрация NO не меняется. Эффективность очистки дымовых газов некаталитическим методом в промышленных условиях составляет от 30 до 70 %.

Применение этой технологии в отечественной энергетике ограничено единственным объектом — котлом типа ТП-87 на Тольяттинской ТЭЦ [8]. Газообразная восстановительная смесь посредством специальных необогреваемых распределительных устройств соплового типа вводится в поток дымовых газов с максимально возможными (критическими) скоростями. Это позволяет решить задачу интенсивного смешения восстановителя с дымовыми газами за счет того, что при критической скорости истечения из выходных отверстий распределительных устройств обеспечивается необходимая глубина проникновения струй восстановителя в поток дымовых газов, а также его равномассовый расход через отверстия одинакового калибра. При этих условиях полное раскрытие струй, а следовательно и заполнение газозола восстановителем, происходит практически в сечении впрыска.

## **6.5. Оценка побочных эффектов реализации мероприятий экологического порядка**

---

Заключительным этапом реализации мероприятий, направленных на решение экологических проблем, после достижения определенного экологического эффекта является проведение комплекса работ с целью достоверной и полной оценки всех реально проявившихся побочных негативных последствий проведенных мероприятий:

- снижение экономичности за счет возрастания химического и механического недожога, увеличения температуры уходящих дымовых газов;
- ухудшение температурных условий работы отдельных конструктивных элементов, поверхностей нагрева;
- проявление побочных негативных экологических последствий совершенствования технологии сжигания, например увеличенный

выход газообразных загрязнителей — оксида углерода и бенз(а)пирена;

- формирование в пристенных участках топочного объема зон с восстановительной средой, создающих опасность коррозии поверхностей нагрева (здесь следует учесть, например, опыт организации ступенчатого сжигания со сбросом части воздуха в топку над горелочным поясом на котле ПК-39 на экибастузском угле, где была зафиксирована интенсивная восстановительная коррозия в нижней части топки; для выявления этих зон необходимо провести зондирование топочной камеры);

- изменение условия шлакования поверхностей нагрева; в топках с жидким шлакоудалением изменение эвакуации шлакового расплава.

Серьезной проблемой является стабилизация экологического эффекта на исходном уровне, установленном в ходе наладочных работ после реконструкции. Во многих случаях отмечается утрата позитивных качеств систем сжигания в ходе последующей эксплуатации. Здесь не идет речь о сознательно завышенных исходных показателях проведенной реконструкции. Это происходит в силу целого ряда обстоятельств — нарушения режима эксплуатации оборудования, технические трудности поддержания оптимального режима сжигания, отсутствие достаточных средств контроля процесса сжигания, проявление непредвиденных негативных последствий усовершенствования систем сжигания и вынужденный отход от рекомендованного (по экологическим показателям) режима, незаинтересованность и неподготовленность эксплуатационного персонала в достижении наилучших экологических показателей. Имеет место нарушение работы усовершенствованных систем сжигания в результате конструктивных их недостатков. Так, ухудшение работы системы трехступенчатого сжигания котла ПК-14, постепенно нараставшее в ходе эксплуатации, привело к прекращению функционирования первоначально эффективной системы. Этого можно было избежать при оперативном принятии необходимых реконструктивных мер. В конечном счете, спустя длительный период эксплуатации, соответствующие меры были осуществлены с восстановлением исходных показателей снижения выбросов  $\text{NO}_x$ .

Для стабилизации экологических характеристик систем сжигания необходимо проведение комплекса мер:

- обеспечение технической возможности поддержания в условиях эксплуатации режима работы топочно-горелочных устройств, создающего полученный эффект по снижению выбросов оксидов азота;
- организация на ТЭЦ качественного непрерывного приборного контроля воздушного режима топки и горелок (параметры воздуха — расход, температура), состава дымовых газов за топкой (избыток воздуха, состав продуктов сгорания);
- предусматривать ответственность разработчика и исполнителя проекта усовершенствования системы сжигания не только за показатели, демонстрируемые непосредственно после реконструкции, но также в ходе продолжительной эксплуатации;
- по истечению согласованного срока эксплуатации котла после реконструкции (один-два года) предусмотреть проведение контрольных экспресс-испытаний с участием разработчика.

---

## Литература к разделу 6

---

1. Росляков П. В., Закиров И. А. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях. М. : Издательство МЭИ, 2001.
2. Подавление эмиссии оксидов азота при ступенчатом сжигании высокорекреационных углей / Н. Ю. Коргулин [и др.]. М. : Металлургия, 1984.
3. Реконструкция котла П-57 М энергоблока 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1 с переводом на ступенчатое сжигание экибастузского угля/Ф. А. Серант [и др.] // Горение твердого топлива : VIII всероссийская конференция с международным участием. Новосибирск, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2012.
4. Модернизация пылеугольных котлов на основе низкотемпературной вихревой технологии / Ю. А. Рундыгин [и др.] // Достижения и перспективы развития энергетики Сибири : Сб. трудов. Красноярск, 2005.
5. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г. А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. 2009. № 1.



6. Шульман В. Л. Методические основы природоохранной деятельности ТЭС. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2000.
7. Шульман В. Л., Паршуков В. С., Глазков В. К. Трехступенчатое сжигание твердого топлива — практический опыт модернизации котлов // Электрические станции. 2003. № 5.
8. Освоение технологии селективного некаталитического восстановления оксидов азота дымовых газов аммиаком на Тольяттинской ТЭЦ / Ю. С. Ходаков [и др.] // Теплоэнергетика. 1997. № 2.

---

## 7. КОНСТРУКЦИИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

---

### 7.1. Характер развития топочной техники в отечественной энергетике

---

С развитием топочных технологий происходила трансформация конструкции, конфигурации, габаритов топки [1]. Важно при этом рассматривать совершенствование топочных устройств как непрерывное развитие данной техники. Развитие технологии сжигания энергетического топлива, с учетом широкого круга решаемых задач, породило большое разнообразие конструкций топочных устройств.

Импульсом совершенствования технологии и устройств для сжигания энергетического топлива на различных этапах развития энергетики выступают различные факторы [2]:

- наращивание единичной мощности котлоагрегата;
- уменьшение затрат ручного труда;
- повышение эффективности сжигания топлива;
- предотвращение шлакования;
- снижение вредных выбросов;
- повышение надежности оборудования;
- уменьшение габаритов котлоагрегатов.

Решение каждой из этих проблем происходило с учетом освоения опыта мировой энергетики. Однако специфичность многих проблем, решаемых отечественной энергетикой, определила огромный вклад наших ученых, инженеров в их решение.

С первых шагов тон в развитии нашей энергетики задавали выдающиеся российские ученые, опытные инженеры-практики. Среди них были известные специалисты-«топочники»: проф. Т. Ф. Макарьев (1870–1945 гг.) — проблемы торфоразработки, конструкции топочных устройств для торфа и горючих сланцев; проф. К. В. Кирш (1877–1919 гг.) — промышленное использование дров как энергетического топлива, шахтные топки для сырых дров. Поэтому первые отечественные котлы с использованием торфа, древесины, тощих углей (антрацит) были созданы на высоком технологическом уровне. Уже тогда была установлена высокая планка ответственной инженерной деятельности в энергетике.

Проследивая весь период развития российской энергетики, можно выделить следующие основные сдвиги в совершенствовании топочно-горелочного оборудования:

1. Совершенствование слоевого сжигания;
2. Переход от слоевого сжигания к факельному процессу;
3. Конструктивное совершенствование топочных устройств факельного сжигания (конфигурация топочной камеры, компоновка горелок);
4. Экологическое совершенствование топочной техники;
5. Повышение уровня контроля и управляемости топочного процесса;
6. Разработка и реализация методов предотвращения шлакования поверхностей нагрева.

Рассматривая каждый этап развития топочной технологии и топочно-горелочного оборудования, необходимо находить ответ на ключевые вопросы:

- какая цель данного технического решения или технологии, какие проблемы решаются;
- обоснованность заявляемой эффективности;
- возможные и реально проявляющиеся побочные эффекты;
- соответствие объективным потребностям развития энергетики;
- вероятная и фактическая сфера реализации данной технологии;
- конструктивное совершенство, надежность и эффективность реально созданного оборудования.

## 7.2. Слоевые топки со стационарным слоем

Открывают историю топочной техники *слоевые топки с неподвижной решеткой* [3].

Топка с неподвижным слоем оснащена плоской колосниковой решеткой, набранной из отдельных колосников (чугунные бруски или балки). Она поддерживает сжигаемый на ней слой топлива, а также служит для распределения воздуха, поступающего на горение, через отверстия в колосниках. Воздух от вентилятора поступает под решетку (первичный воздух), часть воздуха подается над слоем (вторичный воздух). Длина решетки зависит от вида топлива и плотности образующегося шлака и составляет 2,0–2,7 м. Шлаковая подушка предохраняет колосники от пережога, смещая зону интенсивного горения от решетки.

Простота и универсальность таких конструкций определила широкое их применение для сжигания антрацитов, каменных и бурых углей, торфа, дров, для различных технических отходов в котлах малой производительности. Эти свойства сжигания в плотном слое спустя многие десятилетия заставят вновь обратиться к этой технологии, но уже на новом уровне развития — топки с кипящим слоем, циркулирующим кипящим слоем, дожигательные решетки в факельных топках.

Сжигание в слое на простой колосниковой решетке (рис. 7.1, 7.2) характеризуется низкой экономичностью, применением ручного труда для загрузки топлива, шуровки, удаления шлака и золы. Совершенствование технологии и оборудования для слоевого сжигания, устраняющее эти недостатки, а также повышение единичной мощности топки продолжалось в течение первой трети XX в.



Рис. 7.1. Ручная колосниковая решетка:

1 — колосниковая решетка, 2 — загрузочный люк, 3 — неподвижный слой топлива

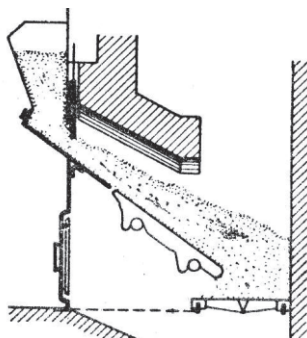


Рис. 7.2. Топка с наклонной колосниковой решеткой

*Последовательно решалась задача механизации процесса. Были созданы:*

- механические и пневматические забрасыватели топлива на слой, исключаяющие наиболее трудоемкие ручные процессы при эксплуатации топки;
- решетки с шурующей планкой, осуществляющей все основные операции (подача топлива на решетку, шуровка слоя, сброс шлака в бункер); движение шурующей планки осуществляется при помощи цепного механизма и электродвигателя;
- решетки с качающимися колосниками с механическим приводом, разрыхляющие шлак на решетках и сбрасывающие в шлаковый бункер нижний слой с малым содержанием недогоревшего топлива (рис. 7.3).

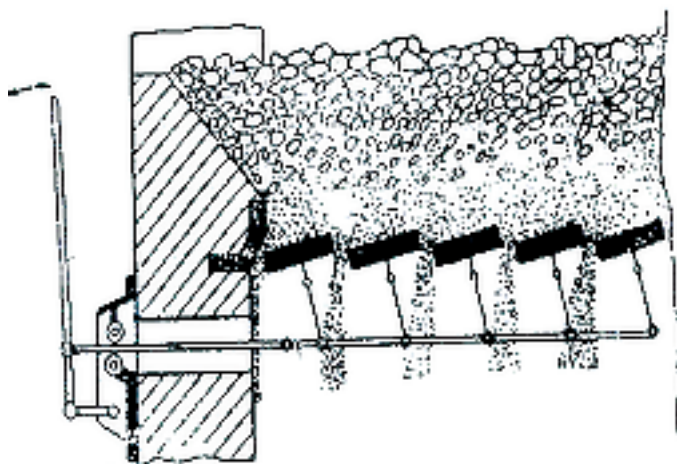


Рис. 7.3. Топка с качающейся решеткой

*Повышение полноты сгорания топлива в плотном слое и в целом экономичность топочного процесса достигались:*

1) переходом от неподвижного слоя:

— к **слоевым топкам с периодическим перемещением топлива на неподвижной решетке** (топки с шурующей планкой (рис. 7.4), решетки с наклонными или ступенчато расположенными колосниками (рис. 7.5), наклонно-переталкивающие решетки);

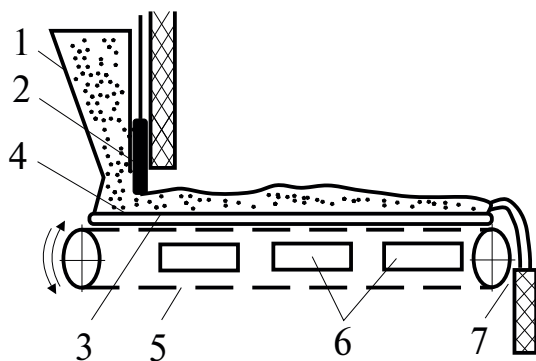


Рис. 7.4. Топка с шурующей планкой:

1 — загрузочный бункер, 2 — шибер для регулирования толщины слоя,  
3 — колосниковое полотно, 4 — шурующая планка, 5 — дутьевые зоны,  
6 — топливо, 7 — шлакосниматель

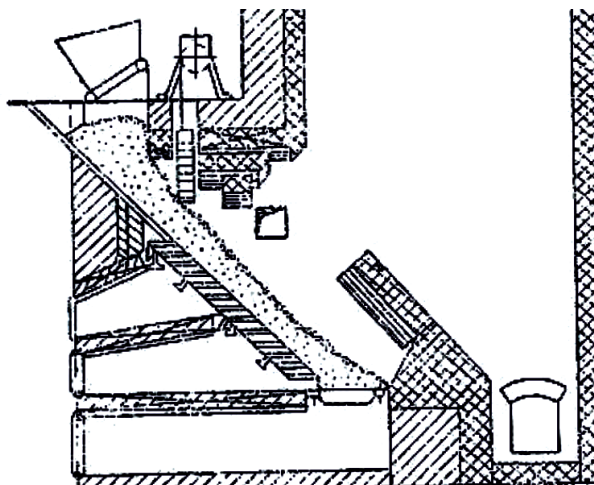


Рис. 7.5. Топка со ступенчатым расположением колосников

— к топкам с непрерывным перемещением топлива в слое вместе с подвижной решеткой (шахтные топки, механические цепные решетки, шахтно-цепные топки, решетки с зажатым слоем); подвижные цепные решетки (рис. 7.6) состоят из ряда ведущих цепей с закрепленными на них колосниками, непрерывно вращающихся и периодически пребывающих в топочной камере и вне ее (внешне напоминают гусеницу трактора); скорость перемещения от 1,8 до 27 м/час;

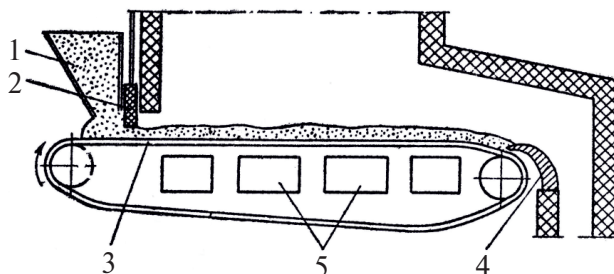


Рис. 7.6. Топка с цепной решеткой:

1 — топливный бункер, 2 — шибер, 3 — цепная решетка, 4 — шлакосниматель,  
5 — каналы для подвода воздуха

2) интенсификацией горения в слое путем **организации вторичного дутья** с подачей воздуха над слоем в виде системы острых струй и **предварительной подсушкой топлива**;

3) дожиганием провала и уноса путем **возврата провала и уноса** (при установке золоуловителя) с топливом в топку; **сжиганием их в топке во взвешенном состоянии**.

Общим недостатком слоевых топок со стационарным слоем является использование крупнокускового угля с размером куска до 20 см при отсутствии мелочи, что требует пребывания в реакционной зоне до 40 мин. Эти условия ограничивают единичную мощность слоевой топки. Кроме того, необходимо предварительно удалить угольную пыль и мелочь.

Сложившаяся методология исследования и совершенствования технологии и аппаратуры слоевого сжигания, обширные исследования в области газодинамики и физико-химических процессов горения и теплообмена в слое послужили существенным фактором дальнейшего развития энергетики. Они будут служить впредь ценным научно-техническим арсеналом.



### 7.3. Топки с кипящим слоем

Топки с кипящим слоем явились следующим этапом развития технологии слоевого сжигания. Первоначально рассматривалась возможность сжигания твердого топлива в режиме полугазификационного двухступенчатого процесса [4]. Позднее, в 60-х гг. прошлого века, разрабатывалась новая технология низкотемпературного сжигания в «заторможенном» кипящем слое. Была выявлена пригодность топок с кипящим слоем для низкосортных топлив и различных отходов (высоковлажных и высокозольных), возможность подавления выбросов оксидов серы. В разработке технологии и конструкции топочных устройств с кипящим слоем большую роль сыграли работы А. П. Баскакова и его учеников [5; 6].

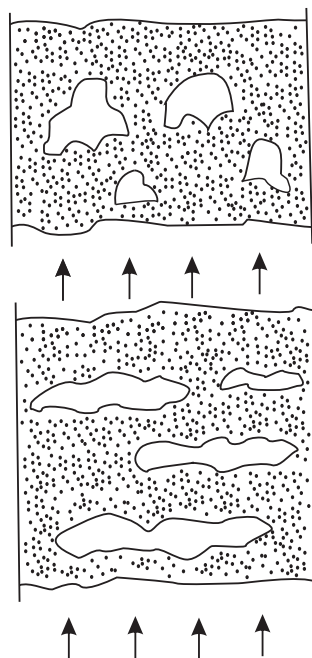


Рис. 7.7. Схема функционирования кипящего слоя в пузырьковом режиме

В топочных устройствах кипящий слой образуется угольными частицами, а также накапливаемой золой, для малозольных топлив в поддержании слоя используется мелкозернистый инертный материал (кварцевый песок, угольная зола). При вводе частиц топлива в кипящий слой происходит их быстрый разогрев за счет теплообмена с окружающими частицами слоя и последующее воспламенение. Процесс сжигания в кипящем слое

отличается неоднородным режимом псевдооживления (наличием пузырькового механизма фильтрации воздуха через слой материала (рис. 7.7)). Такой кипящий слой наиболее распространен в энергетических котлах, эксплуатируемых за рубежом. Температура слоя составляет 800–900 °С. В таком низкотемпературном кипящем слое исключается образование токсичных оксидов азота. Добавка в слой доломита и известняка позволяет при таком уровне температур связать в карбонаты до 90 % оксидов серы.

Интенсивный межфазный массообмен в слое между частицами и газом осуществляется в основном за счет перемещения частиц в горизонтальном и вертикальном направлениях, что определяется движением газовых пузырей. Размещаемые в слое трубные пучки (испарительный, пароперегревательный) обеспечивают отвод 40–50 % теплоты, выделяемой при горении топлива, остальная часть теплоты используется для подогрева свежего топлива в слое и отводится экранными поверхностями нагрева в надслоевом объеме топочной камеры. Наличие погруженных в слой поверхностей нагрева ухудшает перемешивание материала. Однако для погружной поверхности характерен высокий коэффициент теплоотдачи (нагретые частицы топлива соприкасаются с ней непосредственно, и часть теплоты передается не конвекцией, а теплопроводностью). Слой размещается на беспровальной воздушораспределительной решетке (рис. 7.8).

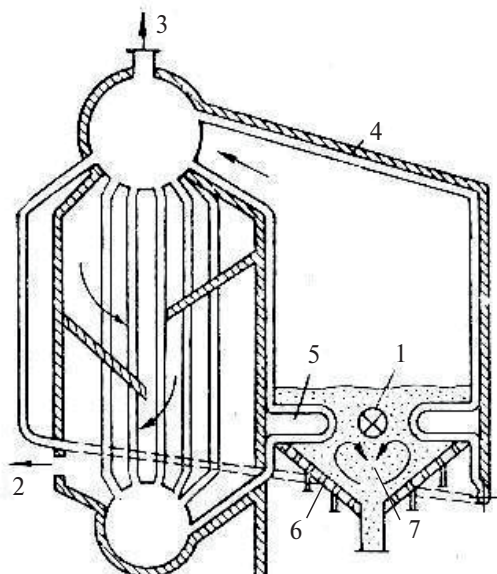


Рис. 7.8. Схема парового котла с топкой кипящего слоя «Флюидфайр»:

- 1 — питатель твердого топлива, 2 — выход дымовых газов, 3 — выход пара, 4 — обмуровка, 5 — погружной теплообменник, 6 — беспровальная решетка, 7 — кипящий слой

К недостаткам топок с кипящим слоем следует отнести:

- вынос до 20–30 % всего углерода топлива (поэтому эти топки рекомендуют применять при возможности дожигания уноса 0–1 мм, в рабочем пространстве котла);
- зашлаковывание межсоплового пространства и самих сопел воздухораспределительных решеток при недостаточном динамическом напоре воздуха;
- высокий абразивный износ поверхностей нагрева, особенно у погружных в кипящий слой.

Оптимизация парового котла на основе технологии кипящего слоя продолжалась в течение всего XX в. Широкое распространение котлы с кипящим слоем для сжигания низкокачественного угля получили в Китае (несколько тысяч действующих объектов), в ряде европейских стран. На Украине работают более 100 паровых котлов с топкой кипящего слоя паропроизводительностью до 10 т/ч. Количество котлов с кипящим слоем в «большой» мировой энергетике не превышает ста единиц, в российской энергетике они практически отсутствуют. При этом Бийским котельным заводом создан широкий круг котлов с кипящим слоем для водогрейных и паровых котельных производительностью до 25 т/ч при высоте слоя 30–40 см (табл. 7.1).

Таблица 7.1

**Характеристики котлов с кипящим слоем Бийского завода**

Тип котла	Избыток воздуха	Температура слоя, °С	Механический недожог $q_4$ , %	$C_{NOx}$ , мг/нм <sup>3</sup>
КЕ-6,3	1,05–1,06	820–1000	11–15	230–500
КВТС-10	1,2–1,3	850–900	4,2	380–470
ДКВр-4	1,33–1,35	850–900	до 8,1	425–470
КВ-1	1,3–1,82	920	6,8	390

## 7.4. От слоевого к факельному сжиганию топлива

Технология слоевого сжигания к началу 30-х гг. XX в. стала тормозом в развитии большой энергетики, она препятствовала росту единичной мощности котлоагрегата свыше 35 т/ч. В итоге слое-

вое сжигание уступило активно развивающейся на ТЭС технологии факельного сжигания пылевидного топлива. На следующем этапе развития энергетики основой его неизменно служила технология факельного сжигания пылевидного твердого топлива, жидкого и газообразного топлива в потоке. Это определило переход к **камерным топкам**. Важнейшим достоинством их является практически неограниченная единичная тепловая мощность, универсальность по топливу — возможность сжигания различных видов топлива отдельно и совместно.

Практика показала, что слоевые топки и технология слоевого сжигания продолжают оставаться эффективным решением в малой энергетике. Многие из представленных технологических и конструктивных решений по слоевому сжиганию оказались востребованными и в ряде современных топочных устройств. В частности, забрасыватели топлива применяются в современных котлах с кипящим слоем, используются устройства пневмотранспорта топлива к горелкам котла, устройства предварительной сушки топлива применяются для предварительной подсушки высоковлажных топлив (древесина, бурые высоковлажные угли).

Вместе с тем после перехода к факельному сжиганию угольной пыли в камерных топках приходилось неоднократно возвращаться к использованию в современных котлах механизмов слоевого сжигания, дополняющих устройства факельного сжигания, с целью преодоления недостатков факельного сжигания при использовании низкореакционных углей. Системы слоевого сжигания трансформируются в крупных котлах в комбинированные камерно-слоевые топки с факельно-слоевым сжиганием. Широко используется конструкция беспровальной решетки в топках с кипящим слоем, а также в факельных топках с слоевым топочным устройством в холодной воронке для дожигания сепарировавшихся недогоревших частиц топлива.

Первым шагом к переходу к факельной технологии сжигания явилось создание комбинированных факельно-слоевых топок. В них основным конструктивным элементом служат цепная решетка и развитая топочная камера (рис. 7.9). Несортированный уголь с размером куска до 40 мм забрасывается на подвижную цепную решетку. Мелкие фракции выносятся непосредственно в топку и сгорают вне решетки во взвешенном состоянии. Крупные куски рас-

пределяются вторичным воздухом по длине колосникового полотна соответственно размеру фракций и сгорают на решетке при контакте с воздухом, поступающим через решетку. Таким образом, формируются две зоны горения — в слое и в факеле. Единичная мощность парового котла при этом увеличивалась до 150 т/ч. Это был первый опыт создания двухзонных топок с выделением зоны сжигания крупнокускового материала (слой) и мелких фракций (в топочном объеме).

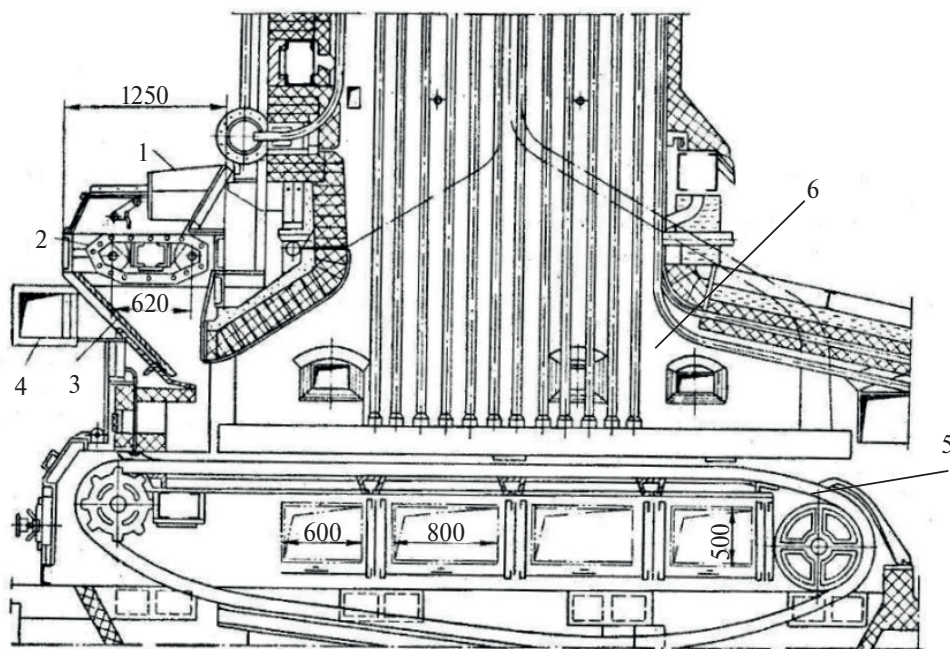


Рис. 7.9. Факельно-слоевая топка:

- 1 — загрузочный бункер, 2 — скребковый питатель, 3 — разгонная плита,  
4 — воздушный короб, 5 — цепная решетка, 6 — топочная камера

Подобные комбинированные топки оказались жизнеспособными и до настоящего времени. Они используются во многих действующих и вновь изготавливаемых котлах малой и средней мощности для решения отдельных задач.

В 80–90-х гг. реализация комбинированного способа факельного и слоевого сжигания осуществлена при реконструкции ряда котлов малой и средней производительности. В ходе реконструкции котла

ТС-35У (производительность по пару — 35 т/ч) внесены следующие изменения:

- вместо цепной решетки установлена колпачковая воздухо-распределительная решетка, через которую поступает 50–60 % расчетного расхода воздуха на котле, при этом стационарный слой замещается кипящим;
- на фронтальной и задней стенках топки установлены сопла острого дутья (через них подается 50–40 % общего расхода воздуха на котел), организующие вертикальный плоский вихрь;
- погружные поверхности нагрева в слое отсутствуют.

В результате в топке обеспечивается высокая скорость ожигания — 9–10 м/с, как у топки с циркулирующим кипящим слоем. Угольные частицы выносятся из слоя в объем топки и стекают в слой по заднему экрану. При такой циркуляции обеспечивается дожигание продуктов частичной термообработки в слое и выносимой из слоя мелочи. До 50 % всей золы остается в топке и выводится через трубу «слива» золы. Величина  $q_4$  не превышает 2,5 %. Выбросы  $\text{NO}_x$  снижаются вдвое (до 200 мг/м<sup>3</sup>). Предусматриваются следующие требования к топливу:

- |   |          |
|---|----------|
| — максимальный размер частиц свежего угля, мм | — до 25; |
| — размер частиц в слое, мм                    | — 0–6;   |
| — содержание частиц размером не менее 1 мм, % | — 15;    |
| — насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>       | — 1100.  |

Еще одним примером комбинированной топки является симбиоз вихревой камерной топки и топочного устройства кипящего слоя (рис. 7.10).

Известные многочисленные разработки факельно-слоевой топки, в которой топка с кипящим слоем выполняет функции предтопка-газификатора, связанного газоходом с камерной топкой факельного сжигания продуктов слоевого процесса. На рис. 7.11 показан такой комбинированный котел типа «Дуклафлюид». Он включает реактор с кипящим слоем, генерирующий горючие газы с температурой 850–900 °С, и прямоточную топку для сжигания продуктов газификации.



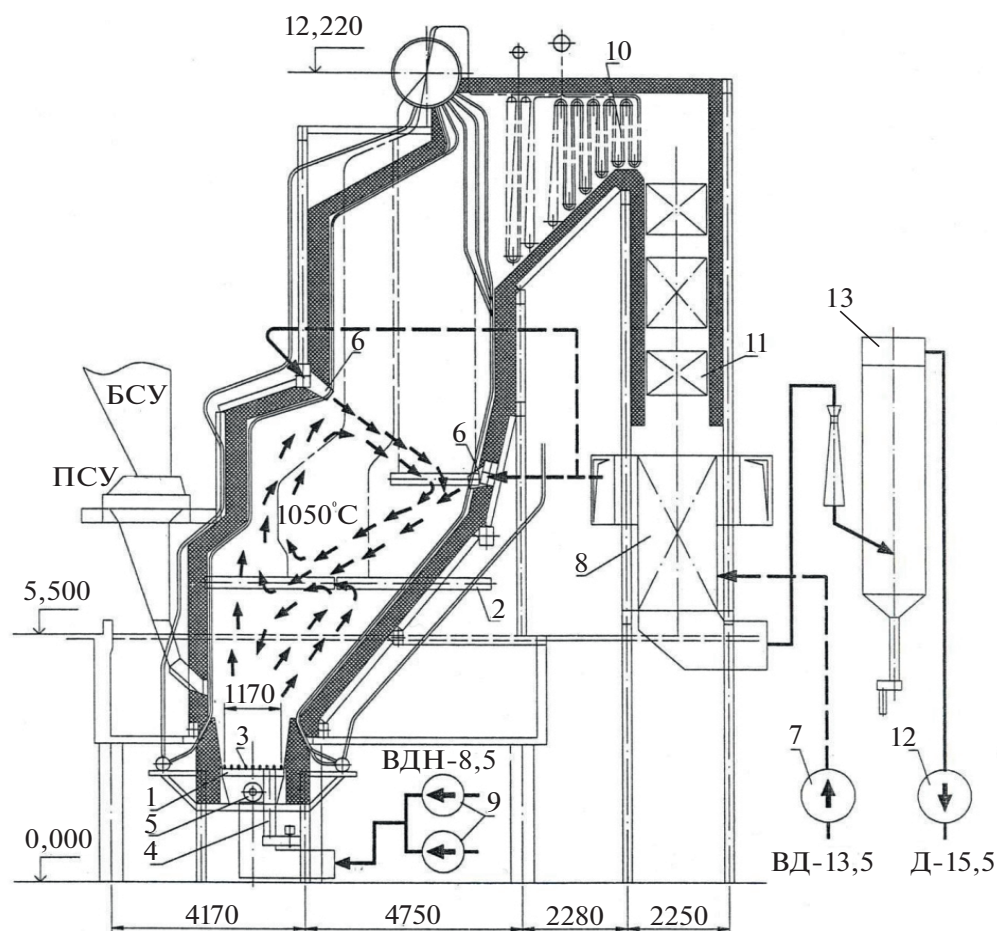


Рис. 7.10. Топка низкотемпературного кипящего слоя с вертикальным вихрем:

- 1 — воздухораспределительная решетка; 2 — охлаждающие панели;  
 3 — колпачки воздухораспределителя; 4 — трубы слива шлака;  
 5 — растопочное устройство; 6 — воздушные сопла; 7 — вентилятор основной дутьевой; 8 — воздухоподогреватель; 9 — вентиляторы высоконапорные; 10 — пароперегреватель; 11 — экономайзер;  
 12 — дымосос; 13 — золоуловитель



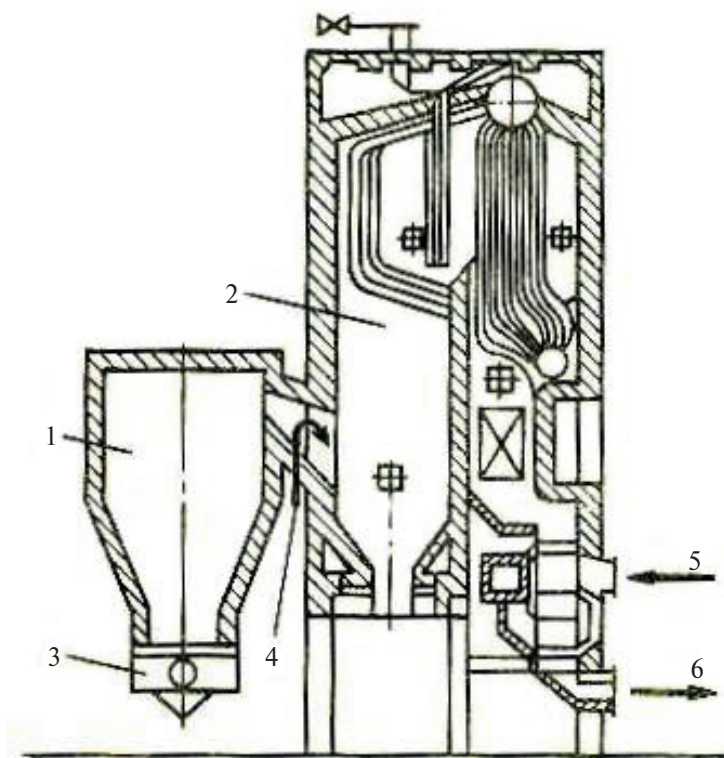


Рис. 7.11. Топка парового котла с предтопком в виде реактора-газификатора с кипящим слоем «Дуклафлюид»:  
 1 — реактор-газификатор кипящего слоя, 2 — топка камерная факельного сжигания продуктов газификации угля; 3 — воздушная камера установки кипящего слоя; 4 — вторичный воздух; 5 — вход воздуха в топку; 6 — выход дымовых газов

## 7.5. Дожигательные слоевые решетки в топках двухзонного сжигания

В отличие от отмеченных выше комбинированных факельно-слоевых топочных устройств, в двухзонных топках используются два типа устройств для ввода топлива — через горелочные устройства над слоем и через дожигательную решетку.

Во многих случаях при сжигании низкокачественных углей дожигательные решетки являются важной частью топочного оборудования. Они обеспечивают дожигание части топлива, выводимой из зоны основного горения при сепарации крупных частиц, а также со шлаком (до 10 %), и служат мощным фактором стабилизации горения. Таким образом, в системе двухзонного сжигания слой на дожигательной решетке не только составляет автономную зону сжигания крупнофракционного топлива, но также воздействует на формирование факела в зоне факельного сжигания, влияя на условия воспламенения и стабилизации.

В больших промышленных масштабах дожигательные устройства использовались в топках котлов с паропроизводительностью до 620 т/ч уже в 60-х гг. XX в. Они располагаются под холодной воронкой и состоят из механических колосниковых решеток. Например, дожигательные колосниковые решетки на шести котлах Владивостокской ТЭЦ-2 установлены в 1977 г., эксплуатировались до последнего времени. В результате их использования повышена производительность котла, расширен диапазон регулирования нагрузки, одновременно отмечено увеличение содержания горючих в шлаке, рост температуры уходящих газов на 10–12 %. В целом КПД котлов остался неизменным.

В настоящее время Кусинский литейно-машиностроительный завод (КЛМЗ) серийно производит дожигательные решетки для дожигания в слое крупных частиц топлива, выпадающих из факела в холодную воронку парового котла (рис. 7.12). Данная решетка используется для парового котла БКЗ–210–140Ф, оборудованного мельницами-вентиляторами.

Техническая характеристика решетки типа РДМ-1,1/3,0:

ширина колосниковой решетки, мм:	1100;
длина колосниковой решетки, мм:	3000;
активная площадь решетки, м <sup>2</sup> :	3,3;
рекомендуемое теплонапряжение решетки, МВт/м <sup>2</sup> :	0,7–1,2;
максимальный размер куска топлива, мм:	50;
содержание в топливе мелочи (0–6 мм), %: не более	40,0.

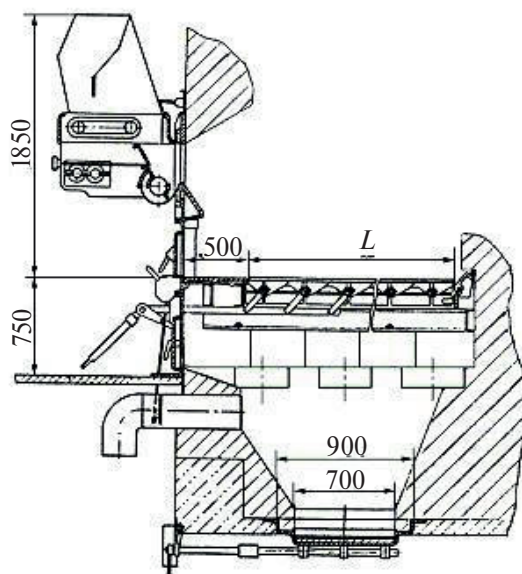


Рис. 7.12. Решетка дожигательная типа РДМ-1,1/3,0 КЛМЗ

## 7.6. Основные конструктивные решения по котлам с циркулирующим кипящим слоем

Расширение использования технологии циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) связано с длительным процессом совершенствования оборудования топочных устройств. Последовательно решались следующие проблемы:

- уменьшение габаритов циклонов с отказом от футерованных громоздких аппаратов и организацией охлаждения тонкостенных конструкций;
- сокращение габаритов котельной установки с ЦКС путем отказа от внешних циклонов и организации внутритопочной сепарации за счет установки в топке разделительных водоохлаждаемых панелей, образующих зону сепарации;
- организация узла перегрева пара для обеспечения сверхвысоких параметров пара мощных котлов.

Динамика совершенствования технологии ЦКС наглядно показана на рис. 7.13.

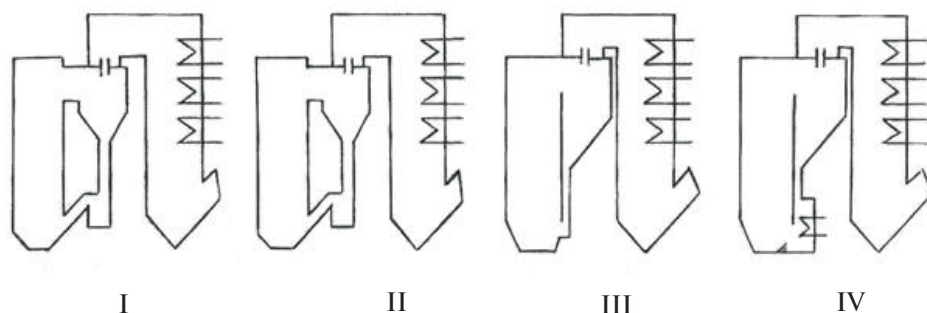


Рис. 7.13. Динамика модификации конструкции котла с ЦКС:

I — неохлаждаемый циклон (1979 г.), II — охлаждаемый циклон (пар, вода) (1988 г.), III — встроенный циклон (1992 г.), IV — встроенный циклон с пароперегревателем (1996 г.)

В конструкциях первых топок с ЦКС были применены мембранные трубные испарительные панели. Циклоны для возврата в топочную камеру вынесенного материала выполнялись с внутренней обмуровкой (I, рис. 7.13). Котлы состоят из водоохлаждаемой топки, легкофутерованного циклона и традиционной конвективной шахты с охлаждаемыми паром ограждениями, с пароперегревателем третьей ступени, промперегревателями второй ступени и промперегревателем первой ступени. Имеются также экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель. В топке размещены панели и ширмы пароперегревателя свежего пара. Уголь подается по течкам через отверстия в экранах нижней части топки. Известняк вводится с помощью двух систем подачи. Котел оборудован десятью пусковыми мазутными горелками. Донная зола отводится с помощью водоохлаждаемых шнеков и охлаждающей золы.

Использование футерованных циклонов требовало обслуживания и вызывало иногда неплановые остановки. В котлах с ЦКС последующего поколения вместо футерованных применяются цилиндрические охлаждаемые циклоны с мембранными стенками (II, рис. 7.13). Такая конструкция использовалась в некоторых котлах, но оказалась слишком дорогой. Использование охлаждаемых циклонов не приводит также к существенному уменьшению габаритов.

В начале 90-х гг. была разработана новая концепция котла с ЦКС, в которой сепаратор интегрирован в топочную камеру (III, рис. 7.13). Эта конструкция имеет по сравнению с традиционными системами следующие преимущества:

- уменьшена масса футеровки в системе, пониженные затраты на обслуживание;
- сокращено время пуска, благодаря меньшей чувствительности к изменению температуры футеровки;
- отсутствуют компенсаторы между топкой и сепаратором;
- уменьшен размер ячейки котла, что может быть важным при реконструкции, с установкой нового котла в существующей котельной.

На начальном этапе развития ЦКС пароперегреватель размещался в конвективной шахте, куда поступали дымовые газы, освобожденные от циркулирующего инертного материала — наполнителя. Температура греющей среды на входе в зону перегрева (не более 800 °С) при конечной температуре пара 550–600 °С определяет низкий температурный напор, малый коэффициент тепловосприятия трубной системы пароперегревателя и необходимость чрезмерно увеличенной поверхности нагрева. В ходе развития технологии ЦКС первоначально ограничились использованием вместо круглых неохлаждаемых футерованных циклонов системы с компактными прямоугольными сепараторами, охлаждаемыми паром (IV, рис. 7.13).

Одновременно с развитием котлов в направлении компактности усовершенствована конструкция пароперегревателя котла, процесс перегрева пара перемещается в кипящий слой с погруженным в него трубным пучком — теплообменник *INTREX* (рис. 7.14). Для этого к топке котла с ЦКС пристраивается компактная топка со стационарным кипящим слоем. На воздухораспределительную решетку поступает часть потока инертной циркулирующей среды после сепаратора, а также определенное количество топлива. Подача оживающего воздуха осуществляется отдельным высоконапорным вентилятором. За счет интенсивного тепловосприятия труб пароперегревателя в слое обеспечивается расчетная температура перегрева пара при низкой температуре греющей среды (до 850 °С) и ограниченной поверхности нагрева труб. Накапливающийся избыток материала в кипящем слое этой компактной камеры удаляется в сток. Такие теплообменники встроены в тракт возврата золы из сепараторов в топку новых котлов. В них используется теплота горячего материала слоя для перегрева свежего пара. Система этого типа является эффективным пароперегревателем [7].

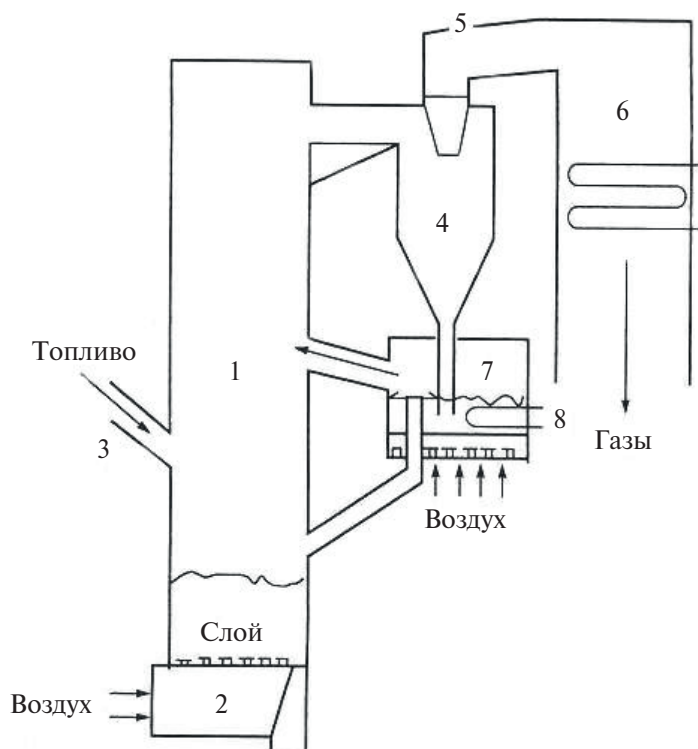


Рис. 7.14. Схема котла с ЦКС с погружным пароперегревателем в кипящем слое:

- 1 — основная топка, 2 — воздушная камера под кипящим слоем, 3 — подвод топлива, 4 — циклон, 5 — переходная камера в конвективную шахту, 6 — конвективная часть котла, 7 — установка кипящего слоя для перегрева пара, 8 — погружной пароперегреватель (теплообменник INTREX)

Наиболее важным обретением технологии ЦКС в процессе ее развития явились два компонента:

- встроенная система сепарации с выделением циркулирующего материала из потока дымовых газов непосредственно в топочной камере;
- высокоэффективная система перегрева пара.

Процессы сжигания в ЦКС в наибольшей степени пригодны для сжигания широкой гаммы топлив. Зарубежные данные по опыту эксплуатации ТЭС с котлами ЦКС показали, что в одном и том же котле сжигаются каменные и бурые угли, отходы обогащения и биомасса. Практически не используются котлы с ЦКС для сжигания стандартных, качественных энергетических углей.

## **7.7. Специфические условия факельного сжигания различных видов топлива в камерной топке**

Камерные топки являются универсальным топочным устройством для различных видов топлива — твердого, жидкого, газообразного. Важнейшим достоинством их является практически неограниченная единичная тепловая мощность, универсальность по топливу (возможность сжигания различных видов топлива раздельно и совместно). Однако при этом в конструкции камерной топки учитываются специфические условия формирования факела различных топлив.

1. Использование факельной технологии для твердого топлива предполагает необходимость трансформации кускового топлива в пылевидное состояние. Потребовалось решать проблемы бесшлакового режима, удаления шлака, абразивного износа поверхностей нагрева, надежного воспламенения.

Первая пылеугольная топка была создана в Германии в 1892 г. В 20-х гг. XX в. были сформулированы представления об основных механизмах процесса воспламенения и выгорания твердых частиц — первоначальная дегазация с выделением летучих, воспламенение их, инициированное этим последующее воспламенение и горение углеродных частиц. Технология факельного сжигания пылевидного твердого топлива и конструктивное ее воплощение складывались в нашей стране с конца 20-х гг. В ходе ее освоения были установлены основные пути повышения интенсивности горения угольной пыли:

- увеличение тонкости помола;
- подогрев воздуха перед вводом в факел;
- разделение всего количества воздуха для сгорания топлива на первичный (необходимый для сгорания летучих) и вторичный воздух (используемый для последующего сжигания углеродной массы коксового остатка);
- доля первичного воздуха, вводимого в топку с угольной пылью, составляет до 40 %.

В результате уже к 1928 г. была создана первая опытно-промышленная система пылеприготовления на Егоршинской ГРЭС (рис. 7.15). С 1932 г. уже началось производство паровых энергетических котлов с пылеугольной топкой. В 1938 г. на Казанской ТЭЦ был сдан



в эксплуатацию котел, оснащенный топкой с жидким шлакоудалением. В эти же годы были созданы экранированные топки, проект топки с двусветным экраном. На всем последующем пути развития энергетики основой его неизменно служила технология факельного сжигания.

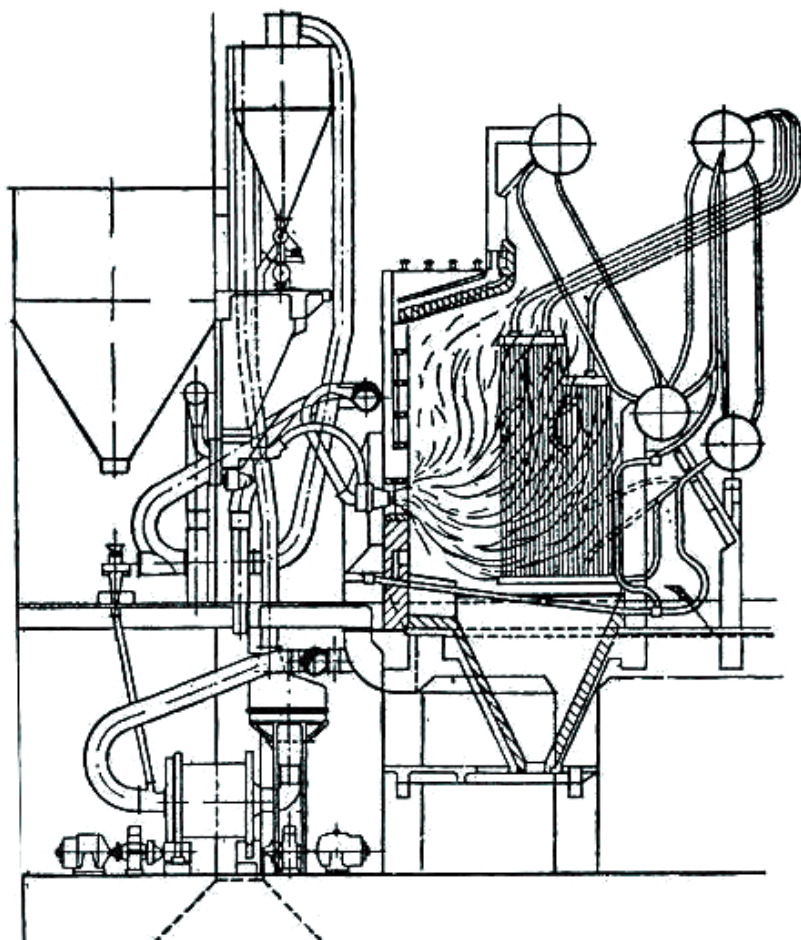


Рис. 7.15. Пылеугольный котел Егоршинской ГРЭС

2. Сжигание мазута в энергетических установках изначально осуществлялось в примитивном камерном топочном устройстве в факельном варианте.

На рис. 7.16 представлена мазутная топка фирмы «Бабкок — Вилькокс» разработки начала XX в.

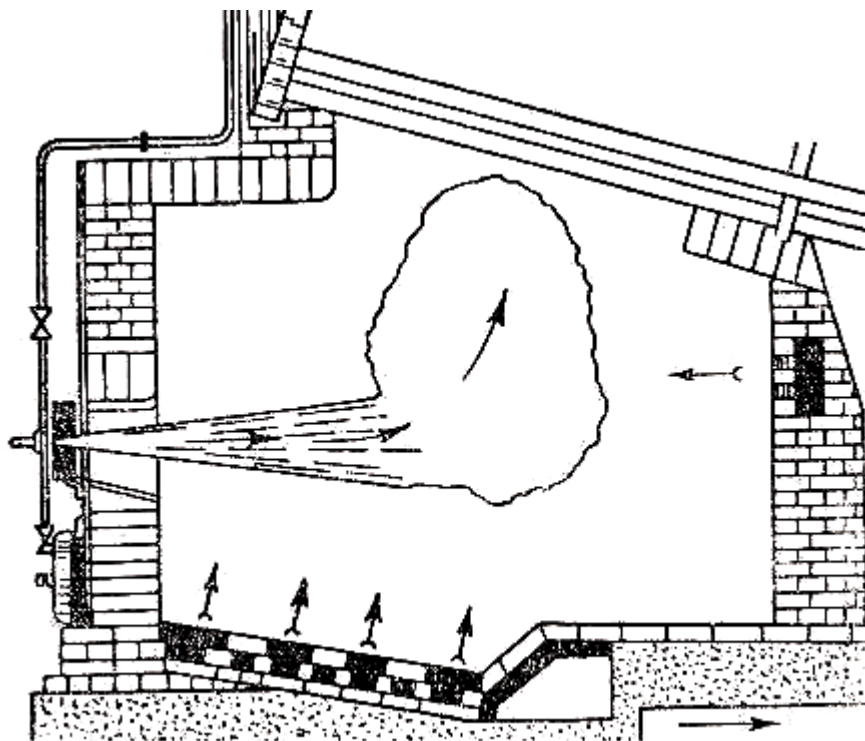


Рис. 7.16. Мазутная топка (1910 г.)

Здесь не используется организованная подача воздуха в зону формирования мазутного факела. Воздух поступает в топку за счет разрежения в ней, не проникая в активную зону факела, а сопровождая его. Вялое смесеобразование требует для сгорания мазута повышенный избыток воздуха ( $\alpha = 1,25-1,30$ ) [8].

Для экономически эффективного использования мазута понадобился целый ряд конструктивных и режимных усовершенствований. В современных топках для сжигания мазута предусматривается:

- организованный подвод горячего воздуха в зону распыленного мазута;
- рециркуляция высокотемпературных топочных газов к корню мазутного факела для воспламенения топливовоздушной смеси и стабилизации факела;
- увеличение протяженности зоны активного горения, поскольку для горения мазута в парообразном состоянии необходимо обеспечить достаточное время на испарение капель мазута;

- исключение попадания распыленного мазута и мазутного факела на ограждающие экранные поверхности;
- обеспечение минимального избытка воздуха при сжигании сернистого мазута ( $\alpha = 1,02\text{--}1,03$ ) [9].

Условия диффузионного сжигания природного газа в камерных топках в большой степени соответствуют конструктивным особенностям пылеугольных топок. Попеременное сжигание в пылеугольной топке твердого топлива и природного газа не вызывает затруднений. Это связано с тем, что эффективное сгорание газа определяется процессами смесеобразования в топочной камере. При наличии вихревых горелок в прямоточных топках этот фактор определяется конструктивными свойствами горелки.

## 7.8. Конфигурация топочной камеры

Сжигание угольной пыли, распыленного жидкого и газообразного топлива в потоке осуществляется в камерных топках энергетических котлов различной конфигурации: **призматические (квадратного, прямоугольного и многоугольного сечения); U-образного профиля, с предтопком циклонного типа; кольцевая топка**, специфичная конфигурация топки башенного котла. Конфигурация топочной камеры определяется конструктивными, технологическими соображениями, условиями ремонтного и эксплуатационного обслуживания, условиями формирования факела и оптимальной аэродинамической структуры потока топочных газов (по условиям массо- и теплообмена), надежности конструкции. Конфигурация топочной камеры связана также с конструкцией прилегающих узлов: поворотной камеры на выходе из топки и компоновки конвективной шахты. Предпринимались попытки использовать иные профили топки, в частности с цилиндрическим корпусом.

### 7.8.1. Призматические топки

Призматические топки реализованы в большей части эксплуатируемых котлов ТЭС. Такой устойчивый во времени приоритетный выбор конфигурации топки для различного вида топлива определяется успешным опытом эксплуатации огромного парка котлов с такими топками. Они выполняются прямоугольного или квадратного сечения, постоянного по высоте топки — это **открытые топки** (рис. 7.17).

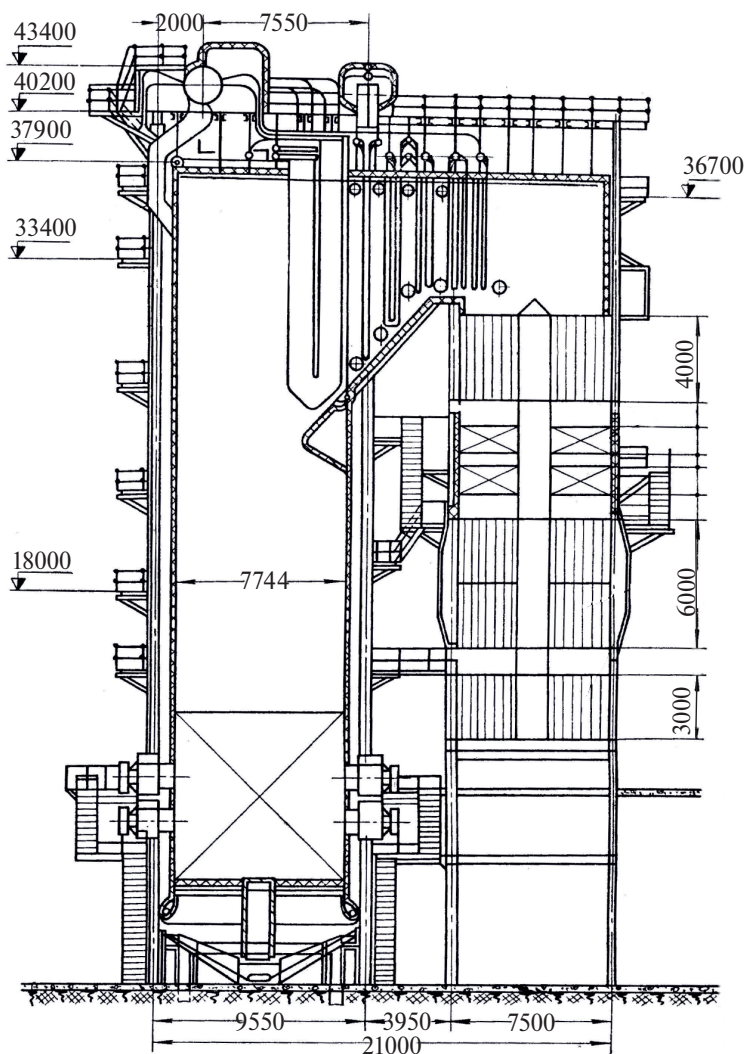


Рис. 7.17. Открытая топка котла ТП-90

Полуоткрытые топки являются разновидностью открытых топок, в которых нижняя часть топки — предкамера — выполнена с сужением, нарушающим прямоточную траекторию факела (рис. 7.18). Она используется в высокотемпературных котлах с жидким шлакоудалением, образуя плавильную зону шлака, и в низкотемпературных топочных устройствах, образуя низкотемпературные вихревые течения (схема топки НТВ [10]).

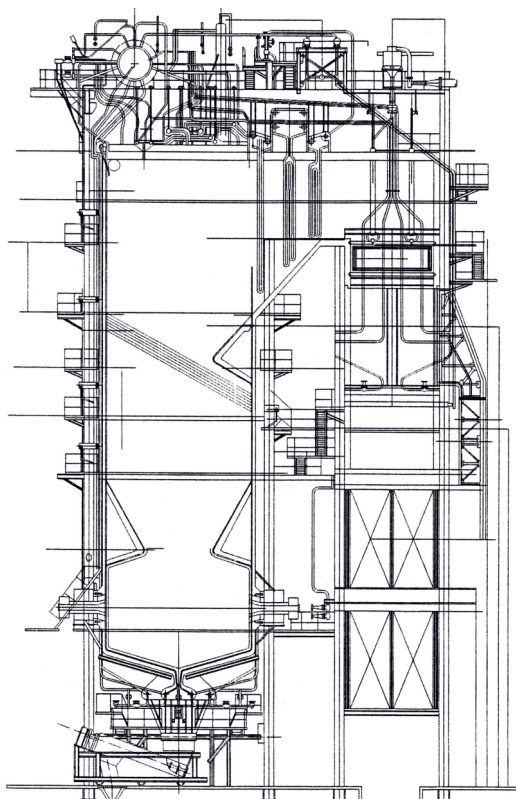


Рис. 7.18. Полуоткрытая топка котла ТП-87 с жидким шлакоудалением

**Квадратное сечение топочной камеры** является оптимальным решением при организации в топке восходящего факела и прямоточного потока топочных газов; фронтальная или встречная компоновка горелок в этом случае обеспечивает наиболее полное и равномерное заполнение сечения топки потоком топочных газов.

**Прямоугольное сечение топки** диктуется необходимостью размещения большого числа горелок в одном ярусе при сохранении всех достоинств топки квадратного сечения. В ряде случаев установкой двухсветного экрана топка разделяется на две квадратных полутопки почти по всей высоте. В топке котла ПК-33 установлены два двухсветных экрана на участке от верхней грани холодной воронки до границы между поверхностями нагрева СРЧ и ВРЧ, при этом образуются три изолированные секции топки.

#### **Топочная камера, выполненная в форме многогранника**

Вариантом призматической топки является топка в виде многогранника. Она отличается срезанными прямыми углами на стыке сте-

нок топки, что создает плоские площадки для размещения угловых горелок, никакого специфического воздействия на организацию факела и топочного процесса такое конструктивное решение не создает. В представленной на рис. 7.19 конструкции топки образованные по углам плоские площадки используются для размещения основных и плазменно-растопочных систем (ПТС).

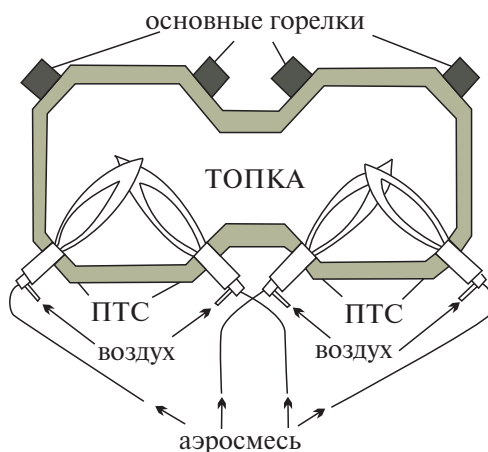


Рис. 7.19. Схема многогранной топки котла БКЗ-640—140

### 7.8.2. Конструктивные особенности призматической топки в котлах различной конструкции

Конструкция котла в значительной мере определяется размещением трех основных его компонентов — топки (радиационной шахты), конвективной шахты и соединительного газохода. Все многообразие соответствующих решений ограничивается следующими типами котлов: Т-образные, П-образные, Г-образные, башенные. Выбор из этих вариантов конструкции котла практически не связан с особенностями топлива и условиями его сжигания, а диктуется в основном стремлением сократить габариты котла и здания, металлоемкость котла и ограничить абразивный износ конвективных поверхностей нагрева при сжигании угля. Однако конструктивные особенности различных типов котлов сказываются на равномерности потока на выходе из топки, условиях стабилизации параметров пара, шлакования и требуют определенной конфигурации выходного участка топочной камеры.



### *Т-образная конструкция котла*

Примером удачного использования Т-образной компоновки может служить котел ПК-39, предназначенный для работы на экибастузком угле с высокоабразивной золой (рис. 7.20). Снижение скорости дымовых газов для уменьшения абразивного износа поверхностей нагрева в конвективной части обеспечивается при такой компоновке организацией двух конвективных шахт. Т-образная компоновка обеспечивает разгрузку газового окна и конвективного газохода с каждой стороны. На выходе из топки выполнено сужение для выравнивания скорости топочных газов при входе в поворотную камеру. Длительный опыт эксплуатации этих котлов (блоки 300 МВт Рефтинской ГРЭС, Троицкой ГРЭС, Ермаковской ГРЭС), а также котлов ТПП-804 блоков 800 МВт Пермской ГРЭС, рассчитанных на уголь, показал эффективность и надежность основных конструктивных решений.

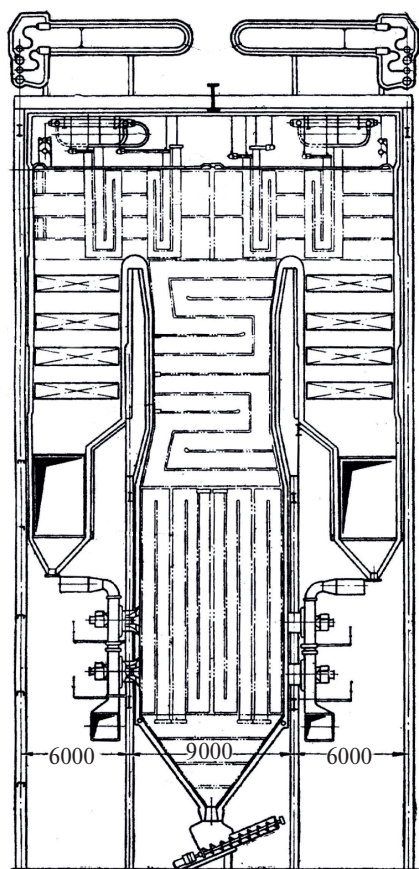


Рис. 7.20. Т-образный профиль топки котла ПК-39 Рефтинской ГРЭС



### *П-образная конструкция котла*

В этом случае конфигурация самой топочной камеры практически стандартная. Но П-образная компоновка (рис. 7.21) упрощает конструкцию топочной камеры за счет упрощения изготовления блочных панелей. Однако односторонний вывод топочных газов ведет к увеличению габаритов поворотной камеры и в целом всего котла. На выходе из топки складывается значительная температурная неравномерность по газу, для компенсации которой используется переброс потоков воды и пара по ширине топки. Такая компоновка традиционно использовалась в крупных котлах: в угольных котлах П-57 (Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск») блоков 500 МВт на Рефтинской ГРЭС, Троицкой ГРЭС; в газовых котлах ТГМП-204ХЛ (ТКЗ «Красный котельщик») блоков 800 МВт Сургутской ГРЭС-2, Нижневартовской ГРЭС.

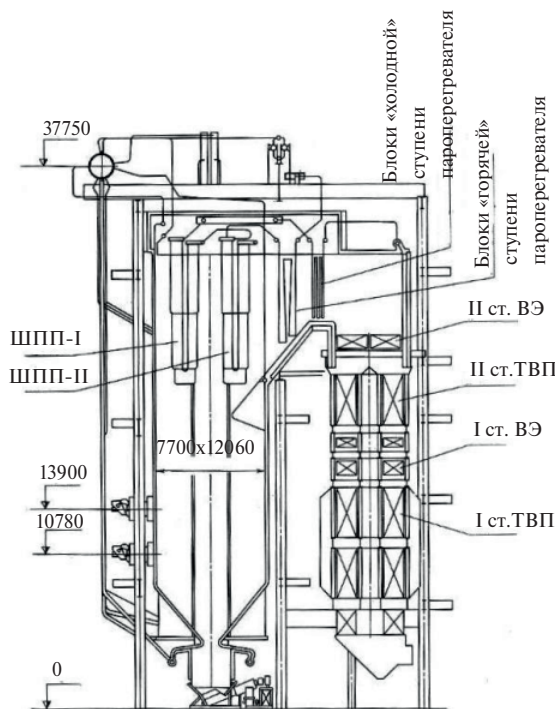


Рис. 7.21. П-образная топка пылеугольного котла

### *Г-образная конструкция котла*

Котел с Г-образной топкой является своеобразной модификацией П-образного котла. В отечественной энергетике большая группа кот-

лов выполнена по этой схеме с вынесенными трубчатыми рекуперативными и регенеративными воздухоподогревателями (рис. 7.22). В США общей для всех пылеугольных котлов является Г-образная компоновка котла с укороченной конвективной шахтой.

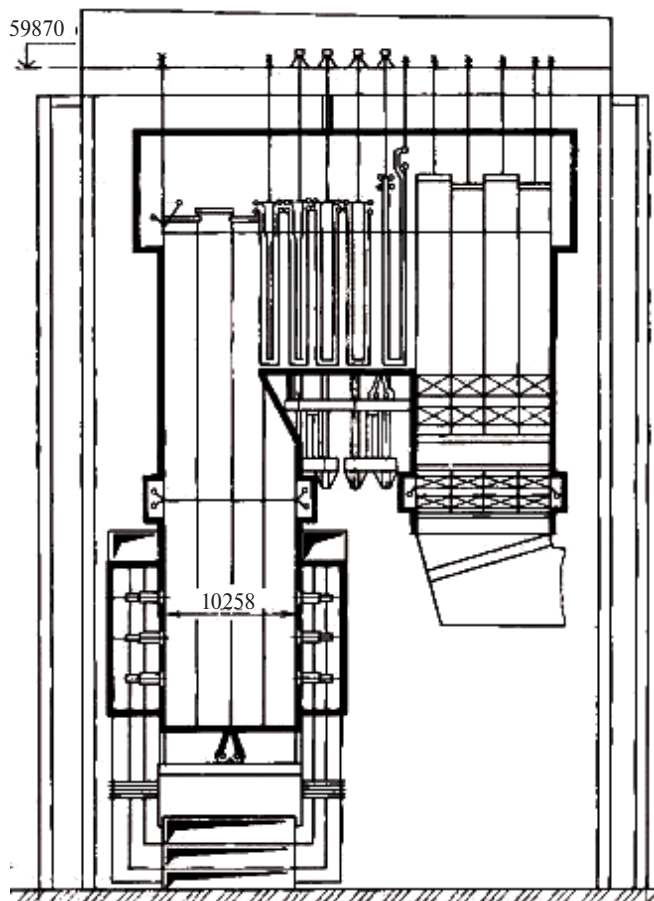


Рис. 7.22. Г-образная компоновка газового котла ТГМП-806ХЛ блока 800 МВт

### *Башенная конструкция котла*

Башенная компоновка (рис. 7.23) разрабатывалась применительно к крупным котлоагрегатам. Вертикальный конвективный газоподъем непосредственно над топкой является ее продолжением. Это исключает использование поворотной камеры, с которой связан поворот потока топочных газов, неравномерность заполнения топочной камеры в верхней ее части. Хотя до настоящего времени башенные котлы на российских станциях не устанавливались, ПАО «Машиностро-

ительный завод «ЗиО-Подольск» и АО «Инжиниринговая компания «ЗИОМАР» при участии ЗАО «СибКОТЭС» имеют опыт проектирования и освоения этих котлов по зарубежным заказам. Такие котлы установлены на блоках 150 и 210 МВт в Турции (ТЭС «Тунчбилек») и Индии (ТЭС «Нейвели»). На этих станциях башенные котлы разрабатывались совместно с итальянской фирмой «Ансальдо». В настоящее время применение башенных котлов в сочетании с системой ступенчатого сжигания для подавления  $\text{NO}_x$  предлагается для сжигания низкосортных углей на блоках 330 и 650 МВт, планируемых для установки на ряде новых российских станций. Преимущества применения котлов башенной компоновки при сжигании абразивных видов топлива (по типу экибастузских углей) обусловлены отсутствием поворотов потоков газа, содержащих инерционные частицы золы, и, следовательно, меньшим износом конвективных поверхностей нагрева.

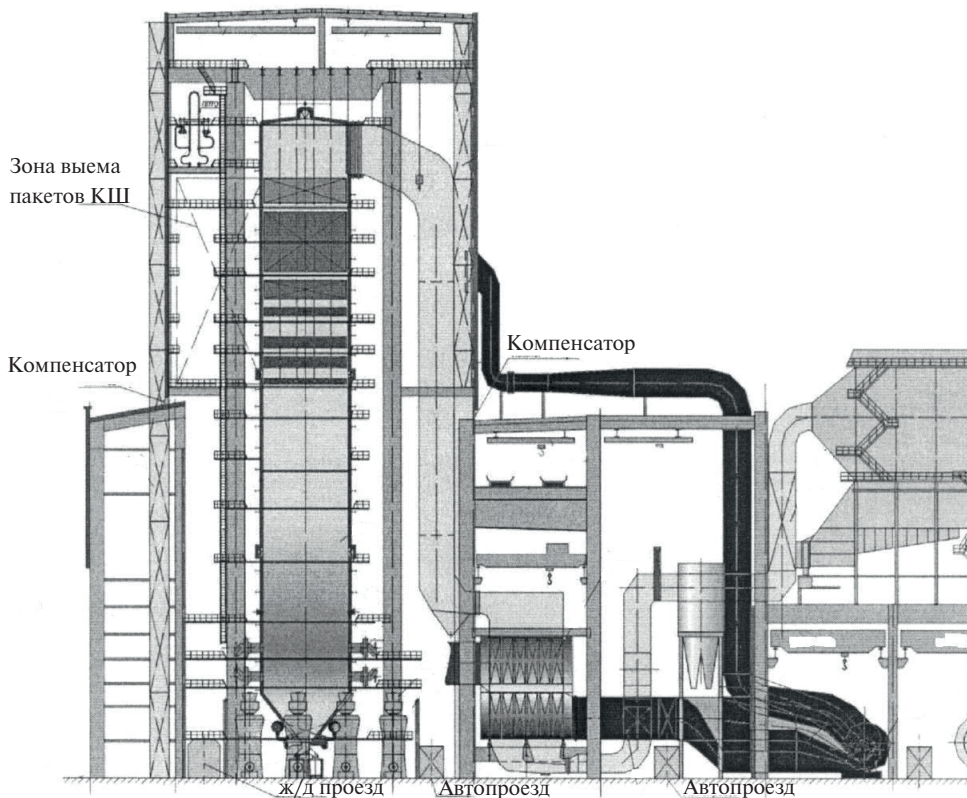


Рис. 7.23. Башенная котельная установка

### 7.8.3. Топки с криволинейной осью

В рассмотренных конструкциях призматической топочной камеры постоянного сечения по высоте сама **топка практически нейтральна по отношению к аэродинамике топочных газов** (прямоточной, вихревой структуры), не оказывая влияния на ее формирование. Топка в этом случае играет роль транзитного канала, по ходу которого реализуются процессы горения, тепло- и массообмена. Отступление от этого положения создают такие конструктивные элементы топки, как пережим сечения в нижней части топки с жидким шлакоудалением, выполнение на выходе из топки аэродинамического выступа задней стенки. В результате в призматической топке осуществляется ограниченное вторжение в формирование аэродинамической структуры факела, потока топочных газов.

Переход к сложному профилю топки — S-образной, U-образной, инвертной — приводит **к непосредственному активному участию самой топки в формировании процессов**, развивающихся в ее полости.

#### *S-образные топки энергетического котла*

Практическое применение топок S-образной конфигурации (рис. 7.24) связано с внедрением технологии низкотемпературного вихревого сжигания — НТВ. Она реализуется путем реконструкции топки энергетических котлов различной мощности — от 85 до 210 т/ч по пару. Например, при реконструкции котла БКЗ-210—13,8 выполнен фронтальной аэродинамический выступ с наклоном вниз на 45°. В результате осуществлен пережим топки на 40 % ее глубины. В устье холодной воронки располагаются сопла нижнего дутья. В образованной таким путем S-образной топочной камере сформированы четко разграниченные вихревая и прямоточная области горения. В нижнем вихревом факеле выгорают крупные частицы, в верхнем прямоточном — сгорают мелкие частицы топлива.

Эффективность такой конфигурации определяется не удлинением траектории факела, а многократной циркуляцией наиболее крупных частиц топлива в отдельном вихревом факеле.

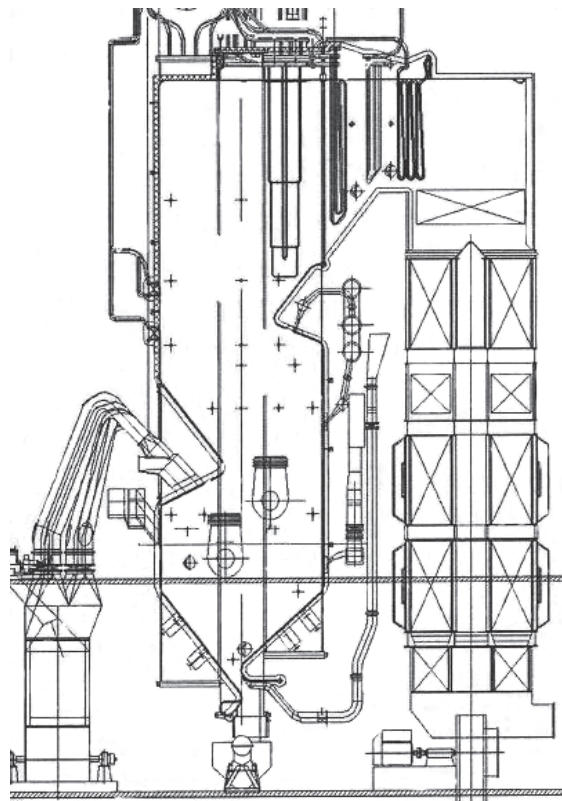


Рис. 7.24. Общий вид топки котла БКЗ-210—13,8

### *U-образные топки*

Известные разработки U-образной топки отличаются выделением в отдельные конструктивно разделенные полости двух традиционных зон — зоны горения в виде нисходящего призматического канала и зоны охлаждения топочных газов в виде восходящего экранированного призматического канала, связанного далее с нисходящей конвективной шахтой. Здесь, как и во всяком нисходящем топливосжигающем устройстве, достигается большая степень заполнения зоны горения факелом. Очевидным достоинством такой топки при работе на угле является сепарация золы в нижней части топки при развороте топочных газов из зоны горения в вертикальную восходящую зону охлаждения. Это ограничивает опасность шлакования, абразивного износа поверхностей нагрева. Подобная схема реализована в ин-

вертной топке, считавшейся перспективной в начале 60-х гг. XX в. (рис. 7.25). Такая конфигурация топки может выполняться за счет использования в качестве нисходящей части топки вертикального циклонного предтопка. В настоящее время подобные решения утратили актуальность.

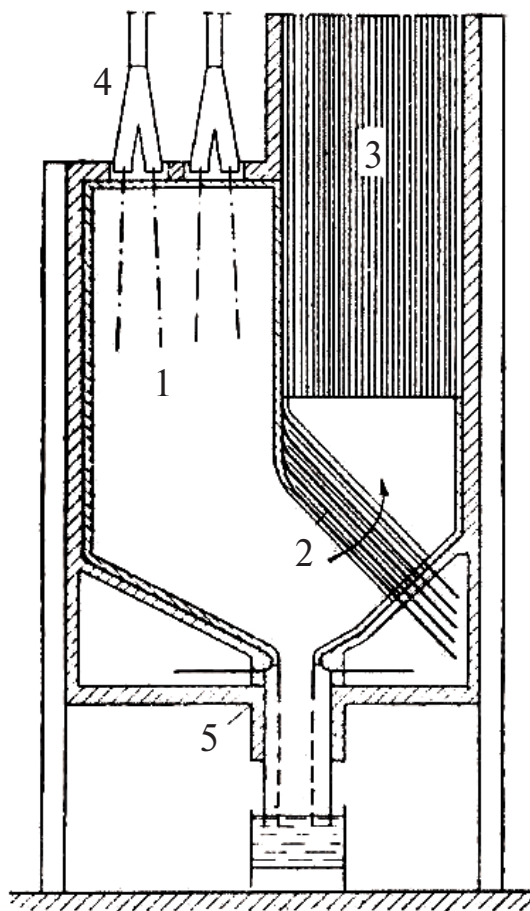


Рис. 7.25. U-образная (двухходовая) топка с жидким шлакоудалением:  
1 — камера горения, 2 — шлакоулавливающий пучок, 3 — камера охлаждения,  
4 — потолочные горелки, 5 — шлаковая летка [11]

На рис. 7.26 приведена конструкция котла ПК-37 на суперсверхкритические параметры пара 29,34 МПа и 650 °С для блока 1000 МВт



(был установлен на Каширской ГРЭС) с U-образной топкой. Хотя такая конструкция котла не получила распространения, однако она способствовала расширению наших представлений о технических средствах воздействия на топочный процесс. При U-образной компоновке котла с расположением горелок на потолке топки опускной факел дает более полное и стабильное заполнение топочной камеры. Установка пылевого бункера непосредственно над потолком топки обеспечивает поступление пыли в горелки без транспортирующей газовой среды, самотеком.

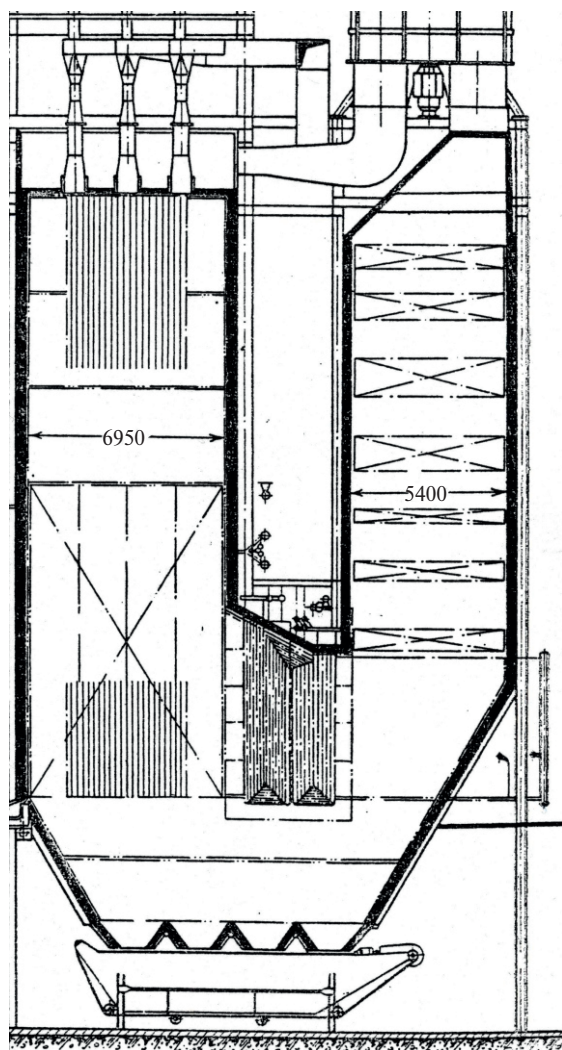


Рис. 7.26. Топка U-образного котла ПК-37 производительностью 710 т/ч



### Плечевая (арочная) топка

Конструктивное отличие плечевой от U-образной топки заключается в наличии двух нисходящих призматических камер горения, примыкающих с обеих сторон к центральной призматической восходящей камере охлаждения. В представленной схеме конструкции фирмы *Foster Wheeler* с потолочным размещением горелок (рис. 7.27) эффективно решены проблемы стабильности факела. Здесь осуществлен рассредоточенный ввод воздуха по длине факела при вертикально установленных патрубках ввода аэросмеси. В такой топке частицы пыли находятся достаточно долго, чтобы газифицироваться и сгореть при относительно низком теплонапряжении в топке, предотвращающем ее шлакование и образование жидкого шлака. Здесь обеспечивается интенсивная рециркуляция топочных газов к устью горелок, улучшающая условия воспламенения и ограничивающая образование оксидов азота.

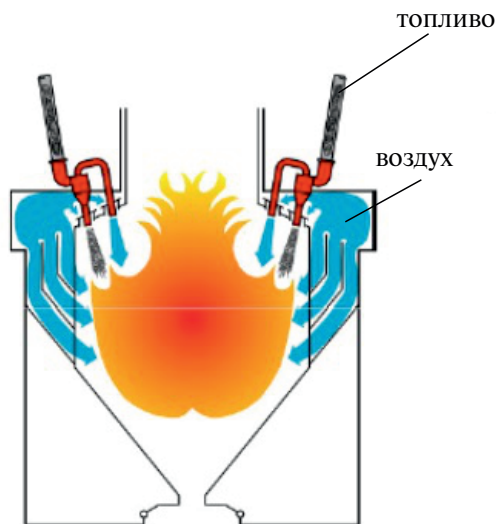


Рис. 7.27. Плечевая топка

Практически во всех эксплуатационных режимах устойчивость факела обеспечивается без подсветки газом или мазутом.

### Инвертные топки

Эти топки, как развитие конструкции полукрытых топок, сохраняют призматическую форму прямоугольного сечения, differing положением горелочных устройств (рис. 7.28). *Инвертные топки*

предназначались для сжигания низкокачественных, трудновоспламеняемых углей и обеспечивали интенсификацию прогрева угольных частиц в вихревых турбулизованных потоках, а также увеличение продолжительности их пребывания в реакционной высокотемпературной зоне [12]. При реализации инвертного факела в топке котла типа ТП-230—3 (1981 г.), работающего на промпродукте донецких газовых углей, в ходе реконструкции были установлены наклоненные вниз патрубки для ввода воздуха 2. Отдельно выполнены горизонтальные патрубки для ввода высококонцентрированной аэросмеси 1. В результате сложилась призматическая топка с инвертными горелками.

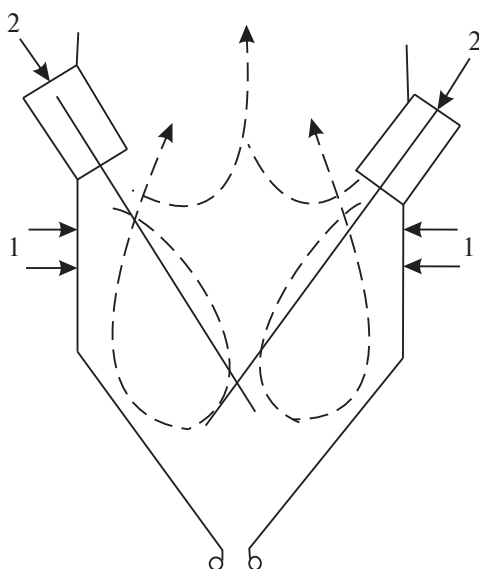


Рис. 7.28. Схема инвертной топки:

1 — аэросмесь ПВК; 2 — вторичный воздух

В инвертной топке горелки расположены в верхней части топочной камеры. Возникающий опускной факел дает полное заполнение объема топки, позволяет использовать инерционные механизмы разделения крупных и мелких частиц при развороте пылеугольного факела. Сосредоточение факела в центре топки благоприятно для поддержания бесшлаковочной работы экранных поверхностей. При сложившейся структуре факела обеспечивается возможность разделения топочной камеры на большое число секций двухсветными экранами.

В развитии этой конструкции появились многочисленные вариации топок с U-образным факелом, в частности плечевая (арочная) топка.

## 7.9. Кольцевая топка

*Кольцевая топка* — это принципиально новая конфигурация топки, реализованная и эксплуатируемая около 10 лет. Она конструктивно выстроена с учетом характера потока топочных газов при тангенциальной установке прямооточных горелок, охватывая кольцевой (спиральный) вихрь топочных газов снаружи и с внутренней его стороны.

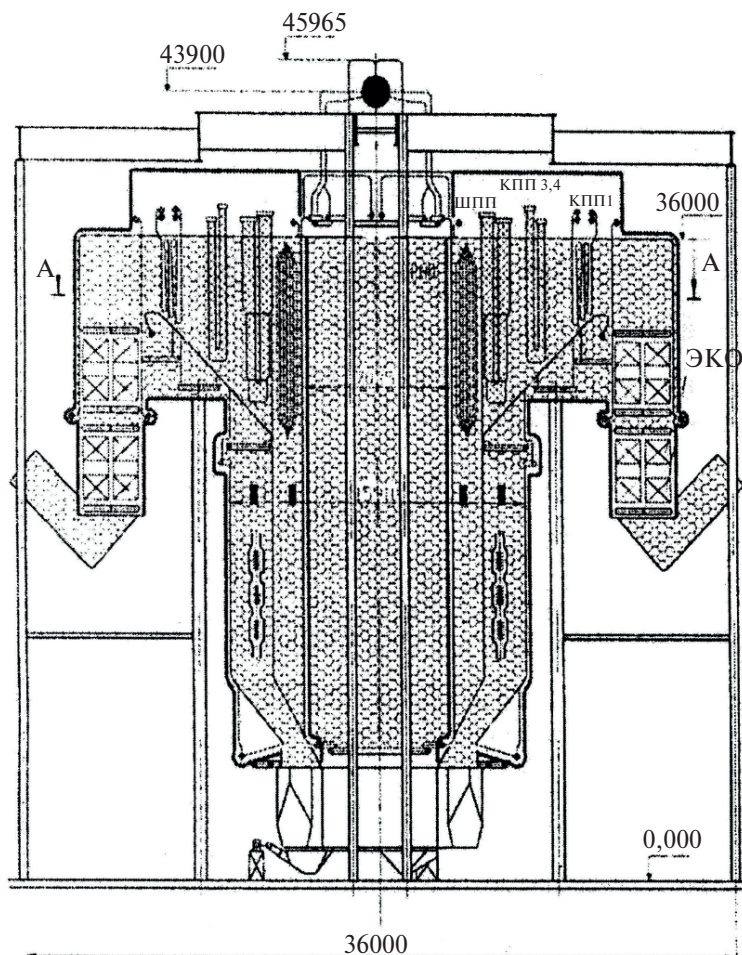


Рис. 7.29. Котел Е-820 с кольцевой топкой Ново-Иркутской ТЭЦ

Конструкция котла с кольцевой топкой была реализована на котле Е-820 производительностью 820 т/ч (рис. 7.29), успешно работающем на Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск) [13;14]. Опыт эксплуатации головного котла с кольцевой топкой показывает высокую надежность конструкции, обеспечение бесшлаковочных режимов работы котла, снижение выбросов  $\text{NO}_x$ . Конструктивно кольцевая топка представляет собой открытую восьмигранную призматическую камеру, внутри которой установлена восьмигранная вставка, состоящая из газоплотных водотрубных панелей. При этом рабочий объем топки преобразуется в кольцевой канал.

Такая компоновка топочной камеры уменьшает высоту котла на 30–40 %, металлоемкость при этом снижается на 15–20 %. Для сравнения: блоки мощностью 800 МВт на основе распространенных на Западе котлов башенной компоновки имеют высоту 150–180 метров, высота котла Т-образной компоновки блока той же мощности на Березовской ГРЭС составляет около 100 метров, а котел с кольцевой топкой имеет высоту всего 62 метра. Его габариты открывают широкие возможности по использованию этого типа котлов при реконструкции существующих объектов, с использованием имеющихся зданий и сооружений. Эффективное использование центрального канала для размещения несущих конструкций также обеспечивает уменьшение металлоемкости котла.

В котле с кольцевой топкой конфигурация топки определяет конструктивные особенности корпуса котлоагрегата, в наибольшей мере влияет на формирование аэродинамической структуры зоны горения и зоны охлаждения.

---

### **7.10. Зонирование топки**

---

Топочное пространство не является целостным, оно дифференцировано по характеру развивающихся в нем процессов — аэродинамических, физико-химических, массо- и теплообмена. С учетом рассмотренных выше особенностей конструкции топки и организации топочных процессов можно выделить отдельные специфические участки объема топочной камеры, выполнить зонирование топки по ряду параметров.

В большинстве отечественных котлов в топочной камере последовательно реализуются процессы сжигания топлива и охлаждения про-

дуктов сгорания. Конструктивно в открытой топке не производится размежевание соответствующих объемов — **зоны горения и зоны охлаждения**.

В зоне сжигания размещаются горелки, отдельные сопла для ввода воздуха. При сжигании тощих углей экранные поверхности частично перекрываются футеровочной массой (так называемый зажигательный пояс) или по всей зоне, что ограничивает отвод теплоты от факела. В этом случае зона сжигания может одновременно выполнять функции плавильной зоны, переводя золу в шлаковый расплав. При этом топка может выполняться полуоткрытой с пережимом, фиксирующим границы указанных зон горения и охлаждения.

В зоне охлаждения топки предусматриваются устройства для организации аэродинамики потока топочных газов: аэродинамический выступ для равномерного заполнения сечения выходного участка топки и поворотной камеры; сопла для ввода газов рециркуляции в верхнюю часть топки для выравнивания температуры по сечению тракта. Кроме того, имеются устройства для сброса отработавшего сушильного агента, для ввода сред для восстановления оксидов азота (некаталитическое восстановление аммиаком), трехступенчатого сжигания (ввод восстановительной и дожигательной сред).

Зона охлаждения наибольшей протяженности (по сравнению с зоной зажигания, выгорания) определяет высоту топочной камеры.

В пылеугольных топках с сухим шлакоудалением выделяется *зона холодной воронки* — специфическая низкотемпературная зона топки, в которой осуществляется накопление, охлаждение, кристаллизация и удаление шлака.

В пылеугольных топках с жидким шлакоудалением нижняя часть топки со слабонаклонным подом образует *зону шлакового расплава*. Здесь реализуются конструктивные мероприятия по поддержанию максимально высокой температуры:

- осуществляется футеровка всей поверхности;
- организуется обогрев летки для вывода шлака;
- устанавливаются надподовые горелки.

В двухзонных топках различного конструктивного выполнения (НТВ-топки, ВИР-технологии, факельные топки с дожигательной решеткой, факельно-слоевые топки) формируются две пространственно разнесенные зоны горения — *прямоточная зона горения мелкой угольной пыли и вихревая зона горения наиболее крупных частиц угля*.

В топках с двухступенчатым сжиганием в пределах зоны горения выделяются две различные по характеру процессов зоны:

- нижняя зона *нестехиометрического сжигания* с пониженным избытком воздуха ( $\alpha = 0,7–0,8$ );
- верхняя зона *дожигания* (выше горелок на расстоянии 3–4 диаметров амбразуры), в которую поступает часть расчетного расхода воздуха, необходимого для полного выгорания топлива ( $\alpha = 1,05–1,08$ ).

Своеобразное зонирование топочного пространства складывается в топке с трехступенчатым сжиганием, в которой полное сжигание топлива рассредоточено практически по всей высоте зоны охлаждения. В режиме трехступенчатого сжигания формируются последовательно по высоте топки:

- зона *основного факела*, в которую поступает 80–90 % расчетного расхода топлива и соответствующая часть расчетного расхода воздуха;
- *восстановительная зона* (расход топлива — 10–20 % с острым дефицитом воздуха);
- *дожигательная зона*, в которую подается оставшая часть воздуха.

Наряду с отмеченными макроразонами, охватывающими все сечение топки или значительный ее объем, можно выделить в пределах макроразонов отдельные локальные зоны, оказывающие существенное влияние на качество топочного процесса:

*пристенные зоны с восстановительной средой*, насыщенные продуктами неполного сгорания, устойчивых ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) и короткоживущих (обрывки реакционных цепей), вызывающих восстановительную, сульфидную коррозию экранных труб;

– *зоны интенсивного отложения и шлакования*, в которых при контакте с экранными трубами возможно образование значительных отложений и шлакования. Эти зоны являются объектами воздействия обдувочных расшлаковочных средств.

В зоне горения можно выделить следующие локальные зоны:

- зона *активного горения* — ЗАГ, в которой имеет место максимальное тепловыделение, здесь осуществляются взаимосвязанные процессы турбулентного перемешивания, диффузии, химических реакций и теплообмена факела с ограждающими поверхностями;
- зона *догогорания*, в ней степень выгорания топлива и температура топочных газов изменяются практически линейно [15].



В пределах каждого отдельного факела выделяются зоны, значимые для его воспламенения и стабилизации, — *зоны рециркуляции* высокотемпературных топочных газов.

Оценка каждой выделенной общетопочной и локальной зоны, установление ее границы, контроль их и оперативное воздействие на них важны на различных этапах проектирования, наладки и эксплуатации топки.

## 7.11. Основные параметры топочной камеры

Габариты и тепловое напряжение топочной камеры являются важным фактором полноты выгорания топлива и образования оксидов азота (помимо условий теплообмена в топке). При устойчивом воспламенении и оптимальном режиме работы горелок тепловыделение в основном завершается в первой по ходу газов половине топки, остальная (верхняя часть топочного объема) служит в качестве камеры охлаждения продуктов сгорания.

На размер топки, определяемый при конструировании котла, оказывают влияние прежде всего шлаковочные свойства угля — чем меньше вероятность шлакования, тем меньше удельный объем топки. Существенным объективным параметром, определяющим уровень выбросов  $\text{NO}_x$ , является тепловое напряжение лучевоспринимающей поверхности зоны активного горения [16]:

$$q_{\text{пр}} = Q_i^r / 2 ((a + b) Z_{\text{яр}} h_{\text{яр}} + 1,5ab),$$

где  $a, b$  — соответственно ширина и глубина топки (в свету);  $Z_{\text{яр}}, h_{\text{яр}}$  — число ярусов горелок и расстояние между ярусами.

Обращает на себя внимание, что в топках с низким тепловым напряжением (меньше  $1,2 \text{ МВт/м}^2$ ) концентрации  $\text{NO}_x$  при работе котлов на мазуте получаются выше, чем на газе, а в топках с более высоким  $q_{\text{пр}}$  наоборот — на газе выше, чем на мазуте. Это объясняется тем, что в топках с низким  $q_{\text{пр}}$  при относительно невысоком температурном уровне в ядре горения существенный вклад в формирование конечной величины  $\text{NO}_x$  вносят топливные оксиды азота, которые образуются при сжигании мазута. При высокотемпературном сжигании топлива, характерном для топок с большими значениями  $q_{\text{пр}}$ , решающее значение имеют термические оксиды азота, концентрация кото-



рых экспоненциально увеличивается с ростом температуры. Поскольку температуры факела в топках этих котлов при работе на газе выше, чем на мазуте, то и выбросы оксидов азота при сжигании газа оказываются выше.

Для отечественного и зарубежного котлостроения характерна устойчивая тенденция увеличения размеров топочной камеры котлов, снижения единичной мощности горелок, многоярусной их компоновки с целью уменьшения теплонапряжения сечения в горелочном поясе (зоне основного тепловыделения). Показательно изменение подхода к определению размера топочной камеры пылеугольных котлов фирмы «Бабкок — Вилькокс». В период с 1962 до 1989 гг. теплонапряжение сечения в горелочном поясе и в топочном объеме в новых котлах снизилось соответственно в среднем с 2,5 до 1,25 МВт/м<sup>2</sup> и с 6,5 до 5,0 МВт/м<sup>2</sup>. Отмечено резкое падение удельной тепловой нагрузки, особенно на котлах выпуска после 1970 г. Эта тенденция продиктована соблюдением ограничений на выброс NO<sub>x</sub>, а также, в определенной мере, необходимостью решения проблемы шлакования экранных поверхностей в нижней части топки.

Сравнение двух котлоагрегатов одинаковой паропроизводительности 2650 т/ч (расчетное топливо — кузнецкий уголь) для блоков 800 МВт — ТПП-804 и ТГМП-204ХЛ (сечение топки по осям труб соответственно 30,89×15,52 м и 20,660×10,258 м) — показывает, что выход оксидов азота при сжигании природного газа на котле ТГМП-204ХЛ с повышенным теплонапряжением сечения топочной камеры составляет 400 мг/м<sup>3</sup> при использовании рециркуляции дымовых газов, что вдвое выше, чем при тех же условиях для котла ТПП-804.

---

## Литература к разделу 7

---

1. История энергетической техники СССР. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1957.
2. Рабинович О. М. Котельные агрегаты. М. ; Л. : Машгиз, 1963.
3. Стырикович М. А., Катковская К. Я., Серов Е. П. Котельные агрегаты. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959.
4. Сыромятников Н. И., Рубцов Г. К. Тепловые процессы в печах с кипящим слоем. М. : Металлургия, 1968. 115 с.

5. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов И. В. Котлы и топки с кипящим слоем. М. : Энергоатомиздат, 1996.
6. Шемякин В. Н. Сжигание твердых топлив в низкотемпературном кипящем слое // Труды ЦУКТИ : сб. трудов. Л., 1978. Вып. 161.
7. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г. А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика, 2009. № 12.
8. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959.
9. Ахмедов Р. Б., Цирульников Л. М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. Л. : Недра, 1984.
10. Опыт применения вихревой низкотемпературной технологии сжигания на котле БКЗ-220–100 / К. А. Григорьев [и др.] // Энергетик. 2009. № 1.
11. Дмитриев А. А., Роддатис К. Ф. Котельные установки ФРГ. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961.
12. Шатиль А. А. Топочные процессы и устройства (исследования и расчет). СПб., 1997.
13. Результаты освоения опытно-промышленного котла производительностью 820 т/ч с кольцевой топкой при сжигании азейских и ирша-бородинских углей / Ф. А. Серант [и др.] // Теплоэнергетика. 2003. № 8.
14. Серант Ф. А. Разработка и исследование кольцевой топки, ее промышленное внедрение и испытания на котле производительностью 820 т/ч : дисс. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1999.
15. Шагалова С. Л., Шницер И. Н. Сжигание твердого топлива в топках парогенераторов. Л. : Энергия, 1979.
16. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб. : НПО ЦКТИ, 1996.

---

## 8. КОМПОНОВКА ГОРЕЛОК КАК ФАКТОР ОРГАНИЗАЦИИ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА

---

### 8.1. Основные используемые способы компоновки горелок

---

**О**сновные принципы и способы компоновки горелок в призматической топочной камере складывались по мере развития конструкции топок, расширения круга используемых топлив, увеличения мощности котлов и габаритов топочной камеры, формирования экологических требований к энергопроизводству. К настоящему времени в эксплуатируемых энергетических котлах используются различные способы размещения горелок, диктуемые конкретными условиями сжигания топлива, взаимодействия горелок со смежными горелками и с ограждающими поверхностями нагрева — боковыми и противоположными. При изменении этих условий зачастую проводится реконструкция с переходом к иной компоновке горелок, адекватной новым условиям.

Выделяются основные варианты размещения горелок:

- *настенная компоновка* (оси горелок ориентированы по нормали к поверхности);

- нормальное положение оси горелок к стенкам топочной камеры в плане либо под некоторым углом относительно вертикальной плоскости;
- фронтальная и встречная компоновка;
- *угловая компоновка* горелок с различной ориентировкой осей:
  - диагональная;
  - попарно встречная;
  - тангенциальная;
  - концентричная;
- *потолочная компоновка* — оси горелок ориентированы вертикально вниз;
- *подовая компоновка* — оси горелок ориентированы вертикально вверх.

На рис. 8.1 представлены схемы, реализованные к началу 60-х гг. Позднее появились новые варианты компоновки горелок — подовая, тангенциальная с рядом концентричных вихрей, концентрическая с различным углом ввода аэросмеси и вторичного воздуха (рис. 8.2) [1].

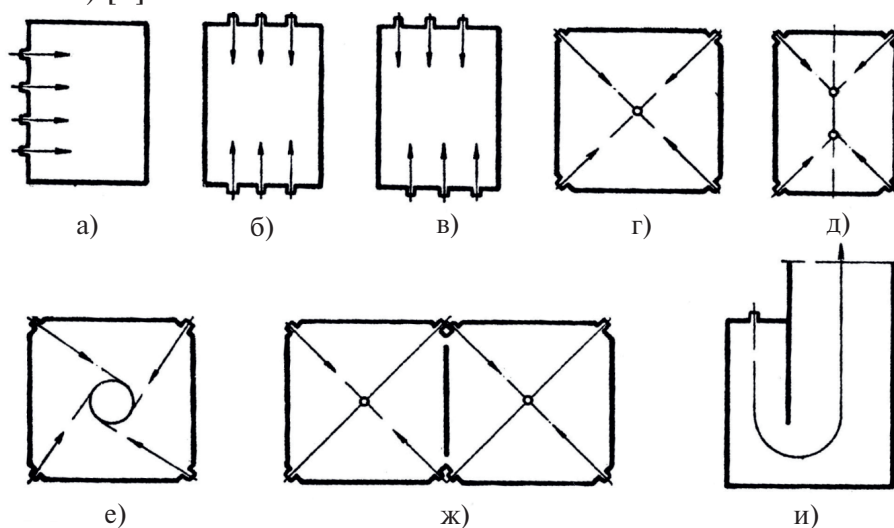


Рис. 8.1. Схема размещения горелок в топочной камере:

- а — фронтальное; б — встречное (боковое); в — встречно-смещенное;  
 г — угловое с общим фокусом соударения струй; д — угловое блочное с двумя  
 фокусными точками соударения пары факелов; е — тангенциальное  
 угловое; ж — угловое в топке с двухсветным экраном;  
 и — потолочное в инвертной топке

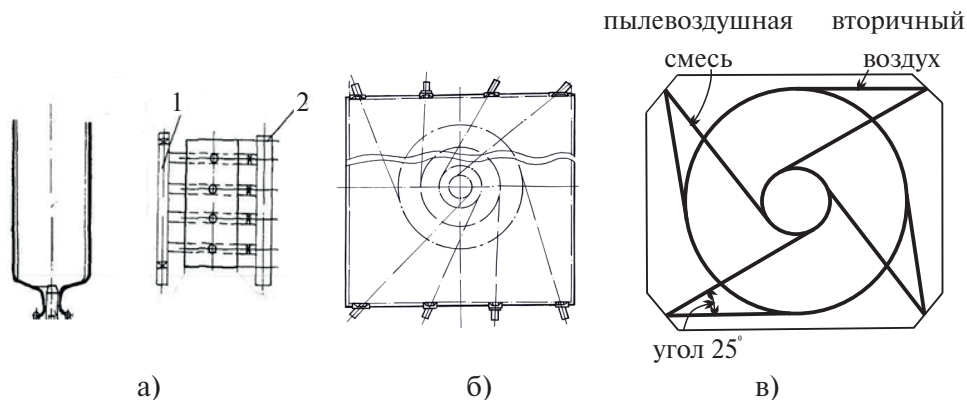


Рис. 8.2. Компоновки горелок:

а) подовая компоновка мазутной горелки: 1 — короб газовой рециркуляции; 2 — воздушный короб; б) концентрическая компоновка горелок с различным углом установки; в) угловая установка концентрических горелок с различным углом выхода аэросмеси и вторичного воздуха

## 8.2. Настенная компоновка горелок

Настенная компоновка является основным способом размещения горелок в топочной камере в различных его модификациях — встречная, фронтальная, наклонная.

Для топки с настенной компоновкой горелок характерным недостатком является неравномерное распределение тепловыделения, особенно по высоте топки. При этом (особенно при сжигании мазута) складывается напряженный температурный режим топочных экранов, в частности нижней радиационной части. Для одного из наиболее мощных современных отечественных котлов ТГМП-204 максимальная температура металла НРЧ достигает 540–550 °С, что способствует наружной коррозии и росту отложений на внутренней поверхности экранных труб. В то же время не обеспечивался расчетный перегрев пара. Эта проблема обострилась в 60–70-х гг., когда возникла задача перевода на мазут большой группы действующих пылеугольных котлов, создавался парк новых котлов, изначально рассчитанных на сжигание мазута.

*Фронтальное расположение* — размещение всей группы горелок на одной из стенок топочной камеры, создает вероятность неблагоприят-

ятного взаимодействия факела (особенно прямоточного) с противоположной стенкой топки — наброс факела при большой его дальностью создает опасность шлакования, локального перегрева экранных труб. Поэтому такая компоновка используется для вихревых горелок в следующих условиях:

- в котлах производительностью по пару до 420 т/ч;
- для нешлакующих углей.

Эти ограничения позволяют избежать шлакования. Прямоточным горелкам при такой компоновке свойственен низкий коэффициент заполнения топочной камеры факелом, поэтому в современных котлах такой способ компоновки горелок не используется.

Фронтальная компоновка горелок в ряде конструкций сопровождается выполнением на задней стенке ряда воздушных шлицев для ввода встречных потоков горячего воздуха, изменяющих траекторию факела, отклоняя его к оси топki.

*Встречная компоновка* — наиболее распространенное конструктивное решение для вихревых горелок, они размещаются встречно на противоположных стенках топki на котлах практически всего спектра мощностей — от 75 до 2650 т/ч. Встречное расположение горелок на противоположных стенках топочной камеры определяет высокую интенсивность тепловыделения в зоне взаимодействия встречных факелов, формирование здесь ядра горения с повышенным уровнем температур. Опыт показывает, что смещение осей горелок при встречной их компоновке способствует снижению максимальной температуры факела в топке и уменьшению образования «воздушных» оксидов азота. Данное конструктивное решение рассматривается в настоящее время как эффективный способ снижения выбросов оксидов азота на действующих и вновь проектируемых котлах. Такое расположение прямоточных горелок имеет ограничение по размерам поперечного сечения топki, его конфигурации, поэтому получило применение в котлах  $D \leq 160$  т/ч при жидком шлакоудалении и  $D \leq 320$  т/ч в котлах с твердым шлакоудалением. при этом необходимо обеспечить достаточное развитие факела на горизонтальном участке струи, что создаст в топке в плоскости оси горелок необходимую температуру, достаточную для воспламенения топливовоздушной смеси рециркулирующими топочными газами и надежной эвакуации шлакового расплава при системе ЖШУ.

Для всей группы горелок с настенной компоновкой важным фактором эффективности является стесненность компоновки. Стесненная компоновка горелок одновременно с интенсификацией смешения смежных факелов приводит к уменьшению раскрытия каждого закрученного потока, сокращению размеров и смещению положения приосевой рециркуляционной зоны. В результате взаимодействие смежных факелов приводит к затягиванию воспламенения и выгорания в начальном участке факела и снижает выход оксидов азота.

Сравнение эффективности топочного процесса в котлах типа ТГМП-312 с двухярусным встречным расположением шестнадцати вихревых горелок и одноярусной компоновкой восьми вихревых горелок большей мощности показывает, что одноярусная, более стесненная компоновка снижает концентрацию оксидов азота в дымовых газах на 24 %, несмотря на увеличение вдвое единичной мощности горелок.

---

### **8.3. Угловое расположение горелок**

---

Угловая компоновка горелок позволяет решать различные технологические и экологические задачи, повысить надежность поверхностей нагрева. Использование угловой компоновки горелок направлено, в частности, на выравнивание падающих тепловых потоков по высоте топочной камеры, снижению их локальных максимальных значений. Для этого осуществляется смещение факела от ограждений топки путем ориентации осей горелок по касательной к условной окружности (тангенциальная компоновка, рис. 8.3, *а*), а также по диагонали топки квадратного сечения в общую для всех горелок точку на оси топки (диагональная компоновка, рис. 8.3, *б*). Угловая компоновка горелок не сводится к размещению горелок по углам топочной камеры, это понятие охватывает все случаи такого размещения горелок, когда оси их ориентированы под углом к оси топки. При этом горелки могут находиться и в углах топочной камеры, и на стенках топки. Такое расположение характерно для прямоточных горелок пылеугольных и газомазутных котлов. Оно реализуется в топках квадратного сечения либо в прямоугольных топках, разделенных двухсветными экранами на полутопки квадратного сечения. В некоторых конструкциях две вихревые структуры, создаваемые угловыми горелками, развиваются в общем объеме без двухсветного экрана.



В ряде случаев установка угловых горелок в призматических топках прямоугольного сечения предполагает изменение конфигурации топки путем выполнения дополнительных угловых граней.

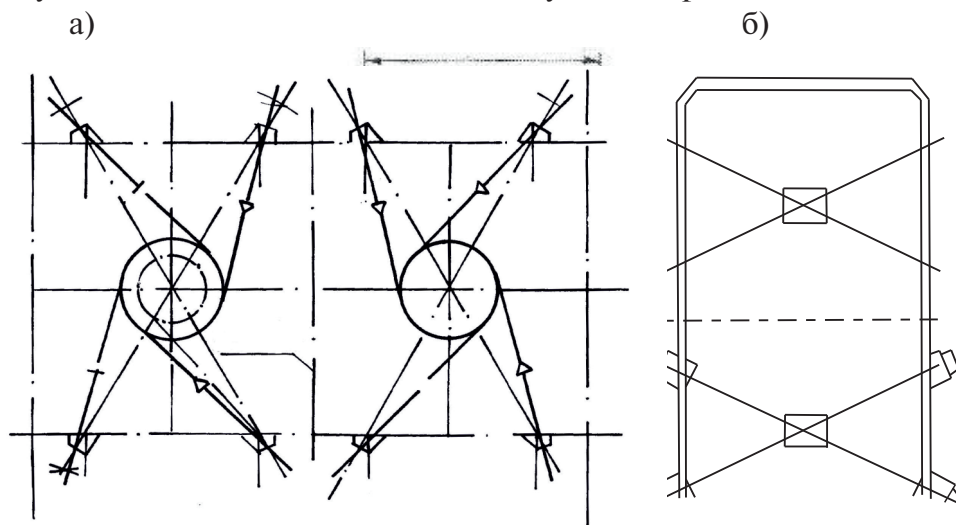


Рис. 8.3. Компоновки угловых горелок

а) тангенциальная компоновка угловых горелок (котел ТП-85);

б) диагональная установка угловых горелок (котел ТП-80)

По сравнению с фронтальным и встречным размещением горелок при угловой компоновке мазутных, пылеугольных и газовых горелок:

- достигается снижение максимальных измеренных падающих тепловых потоков на 25–30 %;
- достигается большая степень заполнения топочной камеры топочными газами и, соответственно, большая интенсивность конвективного теплообмена;
- отсутствует вероятность наброса факела на экранные поверхности;
- изменяется структура зоны горения — вместо системы отдельных автономных факелов (встречных или смежных спутных) формируется общий вихревой факел, охватывающий все сечение топки;
- складываются условия для снижения выбросов оксидов азота за счет замедления воспламенения и выгорания топливо-воздушной смеси от каждой горелки, соответствующего снижения максимальной температуры факела, предварительной термообработки угольных частиц при недостатке воздуха [2].

## 8.4. Тангенциальная угловая компоновка прямоточных горелок

Одним из наиболее распространенных способов организации аэродинамики топки является тангенциальный ввод прямоточных струй аэросмеси и вторичного воздуха в призматическую топку, в результате взаимодействия которых формируется мощная центральная вихревая аэродинамическая структура. В тангенциальной топке процессы смесеобразования, воспламенения и выгорания топлива осуществляются первоначально в прямотоке топливовоздушной смеси отдельных горелок, а затем завершаются в едином спиральном вихре.

Применение топок тангенциального типа для крупных котлов осуществляется с целью использования специфических свойств вихревых потоков — устойчивость течения, повышенная интенсивность тепломассопереноса, увеличение времени пребывания среды в топочном объеме. Значима и экологическая эффективность тангенциальной топки. В ней замедляется смесеобразование и воспламенение на начальном участке факела. Здесь происходит интенсивный прогрев угольных частиц, частичная их дегазация, что подавляет образование оксидов азота и интенсифицирует выгорание топлива на последующем участке факела.

Сочетание в этой схеме специфических свойств прямоточного факела и формируемой в топке при взаимодействии отдельных факелов аэродинамической структуры определяет замедленное смесеобразование, растянутое воспламенение на предшествующем участке отдельных факелов, способствует снижению выходу оксидов азота.

Тангенциальная угловая компоновка прямоточных горелок предусматривает сочетание специфических свойств прямоточного факела и формируемой в топке при взаимодействии отдельных факелов аэродинамической структуры с единым центральным мощным вихревым потоком либо системой вихрей. Такая вихревая структура позволяет обеспечить эффективное выгорание топливовоздушной смеси в высокотурбулизированной вихревой зоне при взаимодействии факелов и замедленное смесеобразование, растянутое воспламенение на предшествующем участке отдельных факелов, способствующих снижению выходу оксидов азота.

Такая компоновка горелок является наиболее характерной для новых, разрабатываемых отечественными заводами котлоагрегатов П-57 Р (ЗиО), Е-500 (Сибэнергомаш) и широко используется в зарубежных конструкциях. В энергетике США тангенциальная топка — это наиболее распространенная конструкция топочно-горелочных систем. Тепловая мощность тангенциальных топок достигает 800 МВт. Каждый горелочный блок включает ряд каналов вторичного и первичного воздуха, монтируемых в одной раме. В топках с угловыми тангенциальными горелками применяются два основных типа горелок — с вертикальными смежными щелевыми каналами для первичного и вторичного воздуха и с горизонтальными щелевыми каналами, чередующимися по высоте. Этот весьма эффективный в экологическом плане способ организации сжигания угольной пыли в настоящее время активно совершенствуется в связи с дальнейшим ужесточением природоохранных нормативов — существующие горелки заменяются малотоксичными прямоточными горелками, организуется ввод третичного воздуха, создающего определенный эффект ступенчатого сжигания.

Отличительной особенностью тангенциальной схемы установки прямоточных горелок, выполненной на котле ТПЕ-215 Новосибирской ТЭЦ, является формирование системы четырех концентричных окружностей, по касательной к каждой из них ориентирована пара горелок, расположенных на противоположных стенках топки (см. рис. 8.2, б). При этом обеспечивается рассредоточение зоны горения по сечению топки с заполнением приосевой и периферийной части сечения топочной камеры.

Следует учитывать, что для прямоточных горелок с тангенциальным расположением возникает опасность шлакования стенок топочной камеры, отклонение струй от геометрической оси горелки со смещением к экранным поверхностям. Этот эффект деривации имеет ряд последствий: с одной стороны, увеличивается заполнение топочной камеры активным потоком, с другой стороны, примыкание потока к стенкам топки.

Существенно новым фактором в развитии данного способа организации факельного процесса является использование тангенциально устанавливаемых вихревых горелок [3]. Это позволяет совместить общие положительные качества тангенциальных топок (более полное и равномерное заполнение сечения топки факелом и топочными газами, более интенсивное тепловосприятие экранных поверхностей

(за счет некоторого смещения факела к экранам), меньший выброс оксидов азота) и свойственное вихревым горелкам более эффективное выгорание топлива, большая устойчивость пылеугольного факела.

## 8.5. Топки с концентрическим сжиганием

Концентрическая компоновка горелок является развитием соответствующей схемы организации топочного процесса — концентрическое сжигание, осуществляемое за счет различного угла ввода аэро-смеси (по касательной к малой условной окружности) и вторичного воздуха (по касательной к концентрично расположенной окружности большего диаметра). Образующиеся при этом два концентричных восходящих потока формируют обогащенную топливом среду в центре топочной камеры и обедненную среду в периферийной части потока вблизи экранных поверхностей. При этом удастся не только снизить выход оксидов азота (за счет увеличения времени пребывания продуктов горения в высокотемпературной среде с дефицитом окислителя и, соответственно, создания благоприятных условий для перехода азотсодержащих соединений топлива в молекулярный азот), но также исключить образование восстановительной коррозионноопасной среды вблизи труб экранов, их шлакование. Концентрическая система сжигания внедряется непосредственно на действующем оборудовании путем реконструкции котлов различных типов.

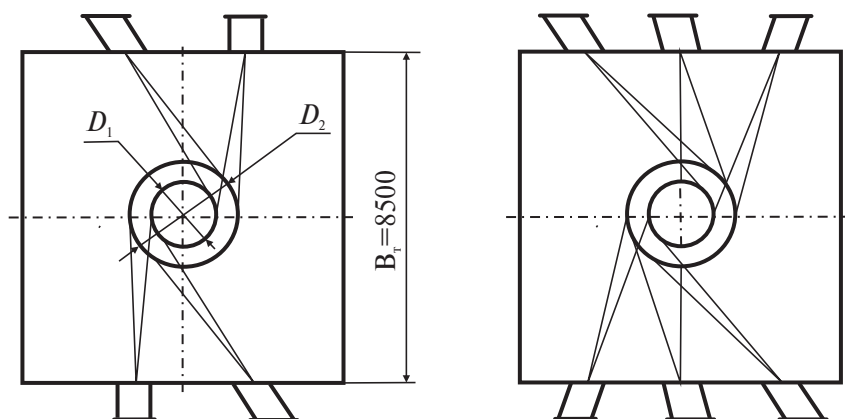


Рис. 8.4. Реконструкция топки котла ПК-40 с организацией концентрического сжигания

На двухкорпусном прямоточном котле типа ПК-40 паропроизводительностью 640 т/ч (Беловская ГРЭС) со встречной компоновкой прямоточных горелок была осуществлена реконструкция с переориентировкой осей горелок с различным отклонением потоков аэросмеси и вторичного воздуха от стенки топки. В реконструированной топке с жидким шлакоудалением достигнуто уменьшение выхода оксидов азота на 50–60 %.

Более чем на 50 % снижены выбросы на котле типа П-57Р при переходе от встречной компоновки вихревых горелок к концентрическому сжиганию — установке прямоточных угловых горелок с различным углом ввода аэросмеси и части вторичного воздуха. При исходной концентрации оксидов азота в дымовых газах 1600–1000 мг/м<sup>3</sup> в рабочем диапазоне нагрузок реконструкция позволила выйти на уровень 600–450 мг/м<sup>3</sup> [4].

Близкое расположение факела в тангенциальных токах к экранам способствует увеличению лучистого и конвективного тепловосприятия экранов, что может стать причиной повышенного загрязнения и шлакования экранов. Эти процессы зависят от расположения факела, определяемого диаметром условной окружности, относительно которой ориентируется направление потоков аэросмеси и вторичного воздуха. Различный угол ввода обоих указанных потоков с наибольшим отклонением к стенке топки потока вторичного воздуха позволяет организовать воздушное экранирование экранных поверхностей и их защиты.

На котле паропроизводительностью 1900 т/ч фирмы *Combustion Engineering* концентрическое сжигание осуществлено отклонением подачи вторичного воздуха под углом 25 ° к направлению потока аэросмеси. Столь значительный угол дивергенции способствует образованию окислительной среды вблизи экранов.

---

## 8.6. Подовая компоновка горелок

---

Подовая компоновка горелок применяется только в газомазутных котлах, она исключает возможность сжигания угля (совместно с газом, мазутом или попеременно с этими видами топлива). Такие компоновочные решения связаны с проблемами сжигания мазу-

та в топках с настенной компоновкой горелок. Характерным недостатком таких топок является неравномерное распределение тепловыделения, особенно по высоте топки. Здесь при сжигании мазута складывается напряженный температурный режим топочных экранов, в частности нижней радиационной части, что способствует наружной коррозии и росту отложений на внутренней поверхности экранных труб.

В нашей стране в 1972–1974 гг. впервые были разработаны проекты реконструкции пылеугольных котлов с применением подовой компоновки горелок [5]. Применение подовой компоновки горелок на газомазутных котлах объясняется необходимостью повышения надежности экранов, упрощения автоматизации котлов при работе в широком диапазоне нагрузок, улучшения ремонтопригодности.

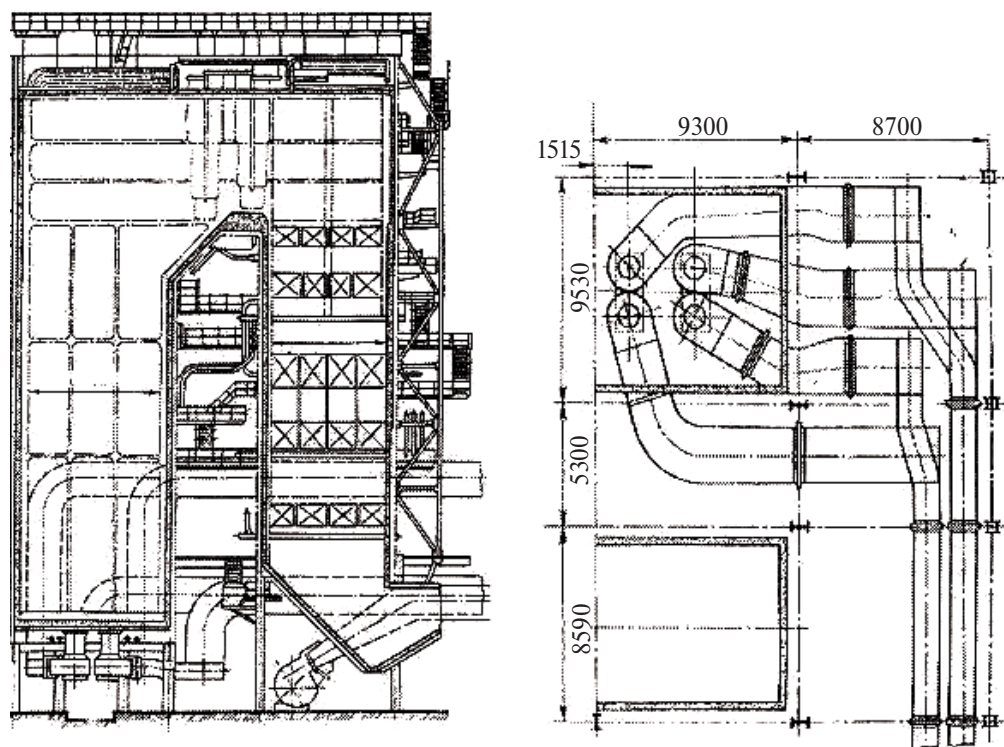


Рис. 8.5. Котел ТГМП-314 с подовыми горелками  
(справа горизонтальный разрез под отметкой 18.000)



Такая компоновка осуществлена, в частности, в топке газомазутного котла ТГМП-314 в составе энергоблока 300 МВт производительностью 1000 т/ч (рис. 8.5). При размерах топочной камеры в плане  $17480 \times 8770$  мм и высотой 32316 мм. Тепловое напряжение при номинальной нагрузке составило  $195 \text{ кВт/м}^3$ . Вместо 16 встречных вихревых горелок (как принято на серийной конструкции топки) установлено на полу восемь подовых вихревых мазутных горелок производительностью по 9 т/ч мазута. В результате среднее удельное тепловосприятие НРЧ существенно уменьшилось, соответственно, возросло тепловосприятие СРЧ и ВРЧ, а также поверхностей нагрева в верхней части топки — экранов потолка, ширмового пароперегревателя.

Для возможности эффективного и регулируемого процесса сжигания подовая горелка выполняется трехканальной, с одним центральным и двумя концентричными периферийными каналами. В каждом из каналов воздушный поток закручивается, организован индивидуальный регулируемый подвод газовоздушной смеси в каждый из периферийных каналов. В результате с переходом на подовую компоновку отмечено [6]:

- перераспределение температур по пароводяному тракту (значительное снижение в НРЧ, меньшее в СРЧ, ВРЧ при повышении температуры среды в ширмовом пароперегревателе);
- уменьшение тепловосприятия НРЧ при возрастании его в СРЧ, ВРЧ, потолочном экране и поворотной камере;
- большая равномерность распределения температуры пара на выходе из коллекторов, в отдельных ширмах, лобовых и выходных змеевиках;
- условия работы промежуточного пароперегревателя не изменились;
- отсутствие роста температуры металла топочных экранов;
- при переходе от настенной компоновки к подовой за счет с минимального избытка воздуха достигается снижение выхода оксидов азота в среднем на 10 %.

Применительно к газовому топливу подовая компоновка не обнаруживает существенных достоинств. Поэтому с резким спадом производства мазута в стране и ростом стоимости мазута это направление в развитии топочной техники практически сошло на нет после бурного взлета до 80-х гг. Многочисленные научные теоретические и экспериментальные исследования, проектные и наладочные работы, опыт эксплуатации не прошли бесследно — многие мазутные котлы продол-



жают успешно работать с подовыми горелками, обогащена методология проектирования, сооружения и наладки систем сжигания энергетического топлива.

## **8.7. Компоновка горелок в инвертных топках и конструктивные решения топки**

---

Инвертные топки с размещением горелок на потолке топки уже давно использовались в США в котлах сухим шлакоудалением [7]. Нисходящая ветвь *U*-образного факела эффективно и равномерно заполняет объем топочной камеры за счет отсутствия поворотов факела. Горелки с большими выходными скоростями воздуха и аэросмеси ограничивают возможность взаимодействия факела с ограждающими поверхностями и шлакования экранов. При этом наиболее горячие газовые потоки за счет меньшей плотности увеличивают свое пребывание в топке и охлаждаются.

В модификациях инвертной топки, разработанной в отечественной энергетике [8], реализуется иной механизм формирования факела. Сохраняется призматическая конфигурация топки, горелки размещаются на боковых стенках с наклоном вниз. При соударении двух наклонных встречных факелов образуются два больших вихревых течения, в которых происходит процесс горения. Регулируя подачу воздуха на воздушные сопла горелок с помощью воздушных шиберов, можно управлять положением факела по высоте топки. Подобная схема реализована в инвертной топке котла ТП-230—3 (донецкий уголь марки Д). Дальнейшего развития схема не получила. Однако она, по существу, оказалась встроенной в схемы низкотемпературного сжигания НТВ и ВИР-технологий в сочетании с нижним дутьем, использована также в двухзонных топках.

## **8.8. Одноярусная и многоярусная компоновка горелок**

---

Все рассмотренные способы компоновки горелок могут использоваться при одноярусной и многоярусной компоновке (помимо подовых горелок). Переход к многоярусной компоновке (пылеугольных

и газовых) связан с увеличением числа горелок (в современных мощных котлах их количество достигает нескольких десятков), которые не могут размещаться в один ряд. Многоярусная компоновка позволяет уменьшить плотность тепловыделения, рассредоточить его по высоте топочной камеры, снизив локальные тепловые потоки на экранные трубы, ограничив образование оксидов азота. Регулируя загрузку (вплоть до полного отключения) отдельных горелок, групп горелок, ярусов, удастся воздействовать на такие характеристики топочного процесса, как температура на выходе из топки, условия работы пароперегревателя, выход оксидов азота (двухступенчатое сжигание), термические напряжения экранных поверхностей. В то же время, поскольку высота топочной камеры существенно больше необходимой по условиям выгорания топлива, формирование протяженного по высоте горелочного пояса не приводит к ухудшению условий выгорания топлива.

В современных мощных котлах с настенной встречной компоновкой вихревых горелок число ярусов может достигать 4–5 с каждой стороны. Высота всего горелочного пояса составляет при этом 20 м и более. При использовании угловых прямоточных горелок возможны ограничения по их единичной мощности, исходя из чрезмерной высоты горелочного пояса. В этом случае угловые горелки размещаются не только по углам прямоугольной или квадратной топки. Потребуется установить дополнительные прямоточные горелки на стенках топки, ориентируя их по направлению к оси для поддержания складывающегося центрального вихря, формируемого угловыми горелками.

---

## Литература к разделу 8

---

1. Резников М. И. Парогенераторные установки электростанций. М. : Энергия, 1968.
2. Чупров В. В., Усман Ю. М. Исследование газомазутного топочного устройства с диагональным расположением круглых прямоточных горелок // Труды ВТИ. 1978. № 15.
3. Серант Ф. А. Котел для блока 600 МВт на экибастузских углях с тангенциальной компоновкой и вихревыми низкоэмиссионными горелками // Горение твердого топлива : сб. трудов VII Всероссийской конференции. Новосибирск, 2009. Ч. 1.

4. Опыт внедрения систем трехступенчатого сжигания на пылеугольных котлах с газовой ступенью восстановления / Ф. А. Серант [и др.]. Режим доступа: [cotes-group.com](http://cotes-group.com).
5. Коваленко А. Л., Чупров В. В., Козлов В. Г. Исследование топочной камеры котла ТГМП-204 П с подовой компоновкой горелок // Теплоэнергетика. 1985. № 4. С. 25–28.
6. Первые итоги наладочных и исследовательских работ на газомазутном парогенераторе с подовой компоновкой / А. А. Андронов [и др.] // Теплоэнергетика. 1977. № 12.
7. Стырикович М. А., Катковская К. Я., Серов Е. П. Котельные агрегаты. М. : Госэнергоиздат. 1959.
8. Шатиль А. А. Топочные процесс и устройства. СПб. б. и., 1997.

---

## **9. ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА КАК ФАКТОР ОРГАНИЗАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА**

---

### **9.1. Динамика развития горелочных устройств**

---

**Г**орелочные устройства энергетических котлов являются инструментом организации факельного сжигания топлива на основе диффузионного горения с отдельным вводом в топку топлива и окислителя [1; 2]. Развитие горелочных устройств энергетических котлов в предшествующие годы первоначально шло в направлении интенсификации смесеобразования и улучшения выгорания топливо-воздушной смеси за счет турбулизации потоков, приспособления горелочных устройств к различным видам топлива, повышению единичной мощности горелки. В дальнейшем круг решаемых проблем расширился, он включал ряд новых технологических и экологических проблем по мере их актуализации:

- с конца 70-х гг. начались активные поиски локальных способов подавления оксидов азота путем конструктивных изменений и оптимизации воздушного режима горелки;
- с переводом многих ТЭС на природный газ потребовалось преобразовать пылеугольные горелки в пылегазовые для попеременного использования в них газа и угольной пыли;
- в связи с нарастающей нестабильностью качества топлива обострились проблемы стабилизации факела;
- регулирование положения факела по высоте топочной камеры воздействием на конструкцию горелки для регулирования параметров топочных газов на выходе из топки, для предупреждения шлакования, поддержания расчетных параметров пара, а также для снижения тепловосприятия наиболее нагруженных элементов поверхностей нагрева;
- приспособление горелок к новым способам подготовки топлива к сжиганию (подвод к горелке высококонцентрированной аэросмеси, водоугольной эмульсии, использование встроенных устройств для подогрева угольной пыли);
- повышение надежности горелок для предупреждения их обгорания, эрозионного износа;
- создание эффективных безмазутных растопочных устройств (с предварительной термообработкой угля, плазменные растопочные устройства);
- повышение эффективности воспламенения и выгорания топливо-воздушной смеси.

Новые проблемы приходилось решать при развитии газотурбинных и парогазовых технологий, что требовало организации эффективного сжигания газообразного топлива в камерах сгорания ГТУ.

Если раньше, до обострения экологических проблем, влияние структуры потока на выходе из горелки ограничивалось рассмотрением ее как фактора воспламенения и устойчивости факела, интенсивности и полноты выгорания топлива, надежности конструктивных элементов горелки (обгорание, износ), то в настоящее время эти показатели уступают приоритет экологическим свойствам горелки. Это связано с тем, что при сжигании топлива в энергетических котлах основная масса оксидов азота образуется в индивидуальном факеле каждой горелки (до 90 %) на протяжении до 2,5–3,0 диаметра амбразуры горелки. Таким образом, на горелки возлагается задача

превентивного воздействия на выход оксидов азота, не допуская их образования в факеле. Потребовался критический анализ опыта создания и эксплуатации высокофорсированных горелок, которые при высокой эффективности сжигания топлива создавали повышенный выход оксидов азота. Оказалось целесообразным вернуться к ранее использованным принципам организации умеренно форсированного факела и управляемого по скорости процесса смесеобразования в вихревых горелках.

Перспективные направления развития факельных горелочных устройств с учетом создания генерирующих мощностей нового класса:

- качественное совершенствование технологии энергопроизводства с повышением экономичности;
- увеличение единичной мощности горелок;
- термическая подготовка угольной пыли;
- обогащение дутьевого воздуха кислородом;
- энергетическое использование различных видов органического топлива — попутного нефтяного газа, газов подземной газификации (угольный, сланцевый газы), продуктов газификации угля, биогаза, шахтного метана.

## **9.2. Общие требования к горелочным устройствам энергетических котлов**

---

Функциональные качества современных горелочных устройств предполагают:

*технологическое совершенство:*

- 1) эффективная организация основных технологических процессов (смесеобразование, воспламенение, выгорание, стабилизация факела);
- 2) соблюдение основных ограничений в реализации технологических процессов (отсутствие шлакования в районе горелочной амбразуры, вибрационных режимов горения, повышенного аэродинамического сопротивления с учетом параметров воздуходувных средств и трактов);
- 3) обеспечение необходимых условий эксплуатационного и ремонтного обслуживания (регулирование и контроль режима работы горелки, ремонтпригодность, безопасность);

4) устойчивость горения в достаточно широком диапазоне нагрузок горелок, особенно в области низких нагрузок;

5) возможность регулирования положения факела в топке при работе котла;

6) возможность работы на различных топливах — универсальные по топливу горелки (пылегазовые, газомазутные).

*экологичность:*

1) соблюдение нормативных требований по ограничению выбросов оксидов азота, оксидов углерода;

2) соблюдение нормативных требований по шумовым показателям;

*надежность:*

1) отсутствие значительных термических, абразивных и иных повреждений конструктивных элементов горелки, препятствующих нормальной эксплуатации горелки в межремонтный период;

2) ограничение абразивного износа подводящих пылепроводов к горелкам.

При целенаправленном воздействии на конструктивные и аэродинамические параметры горелки необходимо учитывать побочные изменения характеристик горелки, ранжировать их по характеру и значимости. В первую очередь следует рассматривать вопросы надежности и безопасности эксплуатации создаваемой или реконструируемой горелки как безусловный приоритет — выход за допустимые нормы должен быть исключен.

Реализация технологии «чистого» сжигания топлива при создании горелок представляет собой по существу компромисс противоположных тенденций: интенсификации процессов сжигания и улучшения экологических свойств процесса.

Снижение выбросов оксидов азота в пылеугольном и газовом факелах достигается в современных горелочных устройствах замедленным смесеобразованием, затягиванием выгорания топлива. Недостаток воздуха в начальном участке пылеугольного факела создает условия для подавления «топливных» оксидов азота за счет термического разрушения связанного азота топлива и перевода его в молекулярный азот вследствие нехватки окислителя. В газовом факеле при замедленном смесеобразовании снижается максимальная температура факела и, соответственно, ограничивается окисление азота воздуха.

Такие режимы работы современной горелки и создаваемая при этом структура факела могут приводить к отступлению от параметров, необходимых для оптимальных условий выгорания, а следовательно, к снижению эффективности процесса горения.



Таким образом, на практике необходим компромисс для сочетания приемлемой эффективности сжигания топлива и допустимого уровня выбросов загрязнителей с дымовыми газами.

Однако такого компромисса недостаточно для оценки приемлемости и оптимальности технологических и конструктивных решений экологической направленности. Помимо этих основных критериев необходим учет и других факторов:

- удельных капитальных и эксплуатационных затрат на достижение экологического эффекта;
- возможных побочных негативных последствий реализации мероприятий (снижение надежности работы оборудования, усложнение его эксплуатационного и ремонтного обслуживания).

### **9.3. Классификация горелочных устройств энергетических котлов**

---

Реализация общих принципов совершенствования горелочных устройств энергетических котлов осуществляется в условиях многообразия конструкций создаваемых горелок. Выбор конструкции горелочного устройства зависит от следующих факторов:

- вид и качество топлива (основного, резервного, аварийного);
- возможность использования в горелке различных видов топлива (попеременное или совместное сжигание);
- компоновка горелок в топке котла;
- система подготовки и подачи топлива к горелкам (прямое вдувание, пылесистема с промбункером, высококонцентрированная аэросмесь, водотопливная эмульсия);
- участие в формировании топочных процессов (регулирование параметров перегретого пара, предотвращение шлакования).

Со временем в результате унификации технологических и экологических требований, с ростом единичной мощности энергетических котлов и сокращением их номенклатуры происходит сокращение не всегда оправданного многообразия конструкций горелок.

Среди многочисленных вариантов горелок с огромным разнообразием специфических конструктивных решений можно выделить горелки с общими свойствами и сгруппировать их по различным параметрам:

- единичная мощность горелки;
- вид используемого топлива — газомазутные, пылеугольные, для сжигания технологических газов;
- аэродинамическая структура потоков — прямоточные, вихревые, прямоточно-вихревые, плоскофакельные, концентричные;
- способ решения экологических проблем — с замедленным смесеобразованием в начальном участке факела (механическим, аэродинамическим, пространственным размежеванием потоков, вводом инертных сред);
- горелки, способные регулировать положение факела по высоте, — плоскофакельные, поворотные, с регулируемой круткой;
- группа вспомогательных горелок — растопочные, надподовые;
- горелки, приспособленные к физическим видам воздействия на формирование факела (акустическое, механоактивация топлива) [3; 4].

К настоящему времени сложился набор достаточно апробированных на практике эффективных конструкций горелочных устройств энергетических котлов, определились рекомендации по их проектированию, эксплуатации. Обе отмеченные тенденции в развитии горелочных устройств — многообразие и унификация конструкций горелок — находят свое отражение в следующей нормативной и методической отраслевой документации (актуальной в определенной степени и сегодня):

- ОСТ 24.836.06—74. Горелки газомазутные (в указатель действующих ОСТ не включен, заменяющий его документ не издан);
- ОСТ 108.030.26—78. Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками;
- РТМ 108.132.02—81. Горелки пылеугольные унифицированные;
- ГОСТ 17356—89 (2005). Горелки на газообразном и жидком топливах. Термины и определения (взамен ГОСТ 17356—71);
- ГОСТ 21204—97. (2002). Горелки газовые промышленные. Общие технические требования (взамен ГОСТ 21204—83);
- ГОСТ Р 52229—2004. Устройства запально-защитные. Общие технические условия;
- МУ 34—70—180—87, СО 34.26.724. Методические указания по испытаниям топочных и горелочных устройств котельных установок;
- РД 34.26.513, СО 153—34.26.513. Руководящие указания по переводу котлов, работающих на сернистых топливах, в режим сжигания с предельно малыми избытками воздуха;

- СО 34.26.727. Методические указания по обеспечению равномерности распределения воздуха по горелкам котельных установок.

## **9.4. Горелки с прямоточной аэродинамической структурой факела**

В энергетике накоплен обширный опыт создания, эксплуатации и совершенствования прямоточных пылеугольных горелок (по аэро-смеси и вторичному воздуху) — от шахтно-мельничных топок до прямоточных тангенциально ориентированных угловых горелок, плоскофакельных горелок, что отражено в нормативных и методических отраслевых документах [5]. Их разработка и внедрение решили задачу эффективного сжигания, надежной стабилизации углей существенно различного качества.

Молодая энергетика России начиналась с использования высоко-реакционных топлив — торф, бурый уголь, мазут, которым вполне соответствовали диффузионные прямоточные горелки. Аэродинамическая структура такого одиночного факела изначально носила характер прямоточных струй топлива (аэро-смеси, мазута, газа) и воздуха. В прямоточных диффузионных горелках прямоточный поток топливо-воздушной смеси после выхода из горелки вдувается в высокотемпературный поток топочных газов. Это способствует их воспламенению в отсутствие приосевых циркуляционных возвратных потоков продуктов сгорания к корню факела (характерных для вихревых горелок). Воспламенение осуществляется по внешней поверхности струи.

Таким образом, формирование факела прямоточной горелки осуществляется в топочной камере. Задачи горелки ограничиваются по существу транзитом сред, а также их распределением в топочной камере. Постепенно функции прямоточных горелок расширялись, и в современных конструкциях они обладают рядом новых свойств, позволяющих в большей мере влиять на структуру факела и условия выгорания топлива:

- интенсификация смешения потоков первичного и вторичного воздуха, топлива и воздуха;
- стабилизация прямоточного факела на срезе амбразуры установкой плохообтекаемых тел;

- рассредоточение потоков аэросмеси и вторичного воздуха формированием многослойной структуры на выходе из амбразуры;
- регулирование факела по высоте топки (плоскофакельные горелки);
- воздействие на течение топочных газов путем изменения направленности ввода воздуха и топлива в топку (тангенциальные, концентричные горелки).

#### **9.4.1. Устройства для стабилизации факела прямоточных горелок**

*1) Внешняя рециркуляция топочных газов как источник воспламенения и стабилизации прямоточного факела.*

Внешняя рециркуляция топочных газов, охватывающая прямоточную струю топливо-воздушной смеси, возникает в результате эжектирующего воздействия струи, развивающейся в затопленном пространстве топки. Поэтому интенсивность циркуляции (и соответственно условия воспламенения прямоточного факела) в определенной степени зависит от размера амбразуры, аэродинамической структуры струи. Эжектирующая способность струи определяется, прежде всего, ее массой, скоростью и конфигурацией.

*2) Стабилизация прямоточного факела плохообтекаемыми телами.*

Универсальные типовые решения по обеспечению устойчивости факела в прямоточных устройствах связаны с организацией зоны обратных токов в следе за плохообтекаемым телом. В энергетических котлах они использованы впервые в качестве стабилизирующего устройства в шахтно-мельничных топках. Они успешно выполняли свою миссию, но требовали частых восстановительных ремонтов.

В пылеугольных горелках ОРГРЭС (рис. 9.1), широко использовавшихся в середине прошлого века в отечественной энергетике, аэросмесь подается в топку прямоточным центральным каналом. На выходе из него устанавливается конус-рассекатель, который имеет двоякое назначение:

- за счет веерного раскрытия потока аэросмеси увеличивается тепловоспринимающая поверхность факела;
- увеличиваются размеры зоны рециркуляции за плохообтекаемым конусом и расход газов рециркуляции к корню факела.

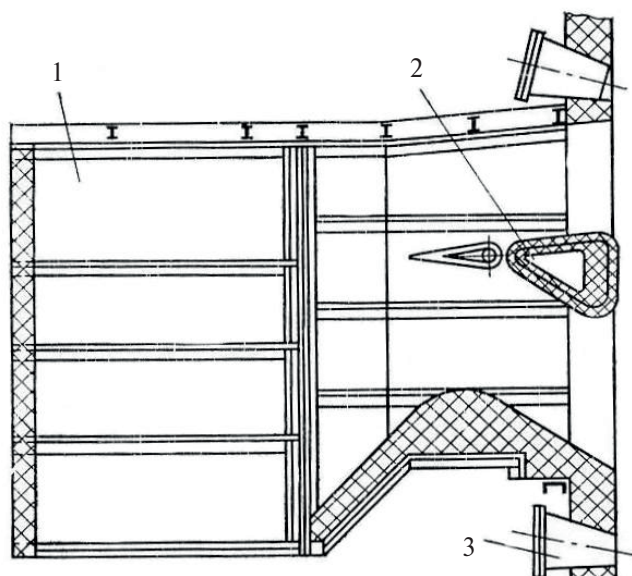


Рис. 9.1. Прямоточная горелка ОРГРЭС в шахтно-мельничной топке с горизонтальным рассекателем в амбразуре:

1 — шахта; 2 — конус-обтекатель; 3 — сопла дополнительного воздуха

### 3) Стабилизация прямоточного факела низкокачественного топлива.

Рассмотренные ранее способы стабилизации прямоточного факела пригодны для топлив с достаточной реакционной способностью (с заметным выходом летучих). Для тощих углей и особенно антрацитов теплота продуктов сгорания по уровню температуры и количеству подводимой энергии недостаточна для стабилизации факела. Здесь требуются дополнительные источники тепла — подсветка факела высококалорийным топливом, ограничение теплоотвода из зоны интенсивного тепловыделения теплоизоляцией части топочного пространства (зажигательный пояс, футеровка холодной воронки, зоны развития факела), высокотемпературный подогрев воздуха и топлива.

## 9.4.2. Способы смесеобразования в прямоточном горелочном устройстве

Для улучшения смесеобразования необходимо сформировать механизмы высокотурбулентного поперечного массо- и теплообмена смежных потоков топлива и окислителя непосредственно в топочной камере за пределами горелки. На практике эта задача решается аэродинамическими и конструктивными способами — организацией соу-

дарения прямооточных струй, чередованием встречных плоских тонких струй окислителя и топлива, вводимых с противоположно установленных каналов, дроблением потока топлива и окислителя на ряд смежных спутных плоских струй малой толщины, тангенциальной ориентацией плоских прямооточных угловых струй, формирующих в топочной камере центральный турбулентный вихревой факел. Последовательное решение этой задачи с использованием все более эффективных конструктивных и технологических приемов можно наглядно проследить на длительном процессе развития и совершенствования шахтно-мельничной топки — одной из первых прямооточных систем сжигания.

### *1) Шахтно-мельничная топка как специфическое прямооточное горелочное устройство*

Прямоточные схемы использовались в шахтно-мельничных топках с открытой амбразурой, в которых весь поток угольной пыли и первичного воздуха поступал в топку монолитным потоком через широкую амбразуру (рис. 9.2) [6]. Этим создавался единый технологический блок: молотковая мельница — сепарационная шахта — горелочное устройство — топочная камера, получивший название шахтно-мельничная топка.

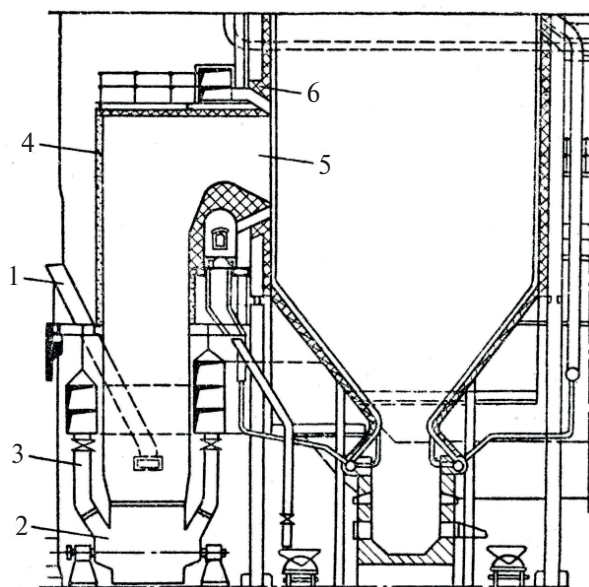


Рис. 9.2 Схема шахтно-мельничной топки:

1 — течка сырого угля, 2 — молотковая мельница, 3 — воздуховод, 4 — сепарационная шахта, 5 — амбатура, 6 — сопла вторичного воздуха



Шахтно-мельничная топка включает помимо собственно топочной камеры также амбразуру для ввода пылевоздушной смеси, шлицы для подачи в топочную камеру вторичного воздуха, гравитационную шахту с горловиной, связывающую размольное устройство и полость топки. Шахта выполняет одновременно функции пылепровода (от мельницы к топке), сушилки, сепаратора. Шахтно-мельничные топки получили значительное распространение для сжигания широкой гаммы различных топлив с большим выходом летучих в широком диапазоне производительности котлоагрегатов — от 10 до 640 т/ч и выше. Это такие топлива как: бурые угли, сланцы, фрезерный торф, а также каменные угли с  $V^{daf} > 30\%$ . Первоначально эти топки выполнялись с открытыми прямоугольными амбразами. Подача вторичного воздуха в топку осуществлялась через верхние и нижние сопла со скоростью 20–40 м/с. Верхние сопла выполнялись с уклоном вниз под углом 45–55°, а нижние — вверх под углом 25–35°.

В качестве первичного воздуха ( $a = 0,4–0,3$ ) служит сушильный и одновременно транспортирующий агент. Устанавливается необходимый расход первичного воздуха (по условиям воспламенения), сушильного агента (по условиям удаления влаги из топлива до приемлемой влажности пыли), вентилирующего агента (обеспечивающего вывод готовой пыли из зоны размол), транспортирующей среды (обеспечивающей гравитационные процессы сепарации пыли в вертикальной шахте и подачу готовой пыли в топку). Количество первичного воздуха, вводимого в шахту вместе с топливом, соответствует оптимальному расходу первичного воздуха. По условиям сепарации, учитывая скорость витания частиц, в шахте поддерживаются небольшие скорости — порядка 3 м/с и менее, а при выходе из горелок, чтобы избежать затягивания факела из топки, скорость увеличивается до 3,5–5,5 м/с.

Эта топочно-горелочная система стала на десятилетия оптимальным устройством для сжигания бурых углей, торфа, каменных углей с большим выходом летучих. Ее жизнеспособности способствовала конструктивная простота, надежность, низкие удельные расходы электроэнергии на размол и транспорт угольной пыли. Впрочем, время показало также и недостатки шахтно-мельничных топок:

— сравнительно низкая скорость выхода аэропыли из амбразуры приводит к плохому заполнению топки факелом;



— принятая схема подачи вторичного воздуха не обеспечивает хорошего смешивания потоков первичного и вторичного воздуха.

## 2) Струйное смешение вторичного воздуха с потоком аэросмеси

Поскольку принятая первоначально схема ввода вторичного воздуха в топку через отдельные сопла, наклоненные к горизонтальной оси потока аэросмеси на выходе из амбразуры, показала неудовлетворительное смешение потоков, конструкция шахтно-мельничной топки последовательно совершенствовалась [7] (рис. 9.3–9.5):

- с установкой рассекателя изменился угол наклона нижних сопел, они развернуты вниз под углом  $30\text{--}35^\circ$ , сохраняя наклон к потоку аэросмеси;
- сопла вторичного воздуха перемещены непосредственно в амбразуру, начальное смешение осуществляется еще до выхода потоков в топку; однако сопла при этом трансформировались в плоские каналы, активное смешение аэросмеси с воздухом ограничено.

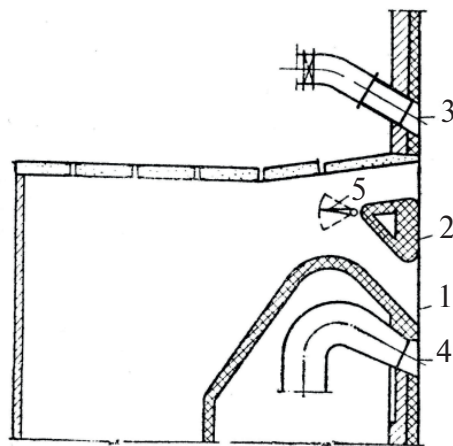


Рис. 9.3. Горизонтальный рассекатель с поворотным шибером:

1 — амбразура, 2 — рассекатель, 3 — верхние сопла, 4 — нижние сопла,  
5 — поворотный шибер

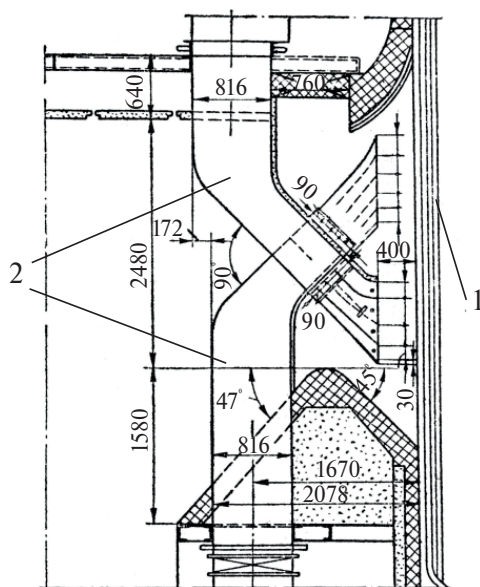


Рис. 9.4. Эжекционная амбразура:

1 — амбразура, 2 — сопла вторичного воздуха

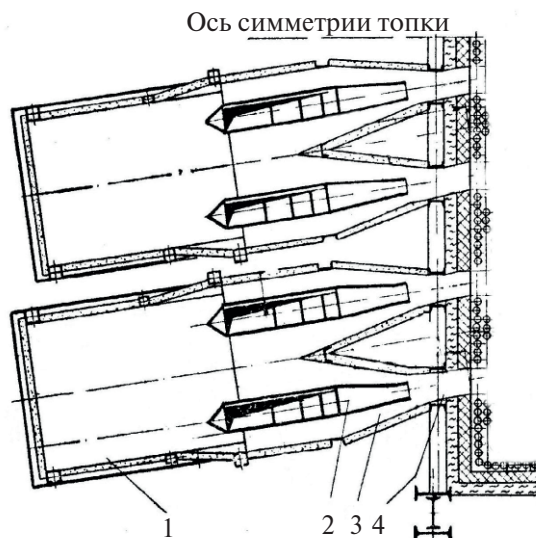


Рис. 9.5. Ввод вторичного воздуха в поток аэросмеси тонкими струями:

1 — сепарационная шахта, 2 — сопла вторичного воздуха,  
3 — каналы аэросмеси, 4 — вертикальные щели амбразуры

### *3) Установка горизонтальных рассекателей*

Установка горизонтальных рассекателей в амбразуре выполняет две задачи:

- разделяет поток аэросмеси, способствуя большему углу раскрытия факела и большему заполнению топочной камеры, увеличению тепловосприятости экранных поверхностей;
- улучшает воспламенение аэросмеси за счет организации рециркуляции топочных газов к амбразуре.

### *4) Эжекционная система подачи аэросмеси вторичным воздухом*

Использование энергии вторичного воздуха для эжекции аэросмеси позволяет увеличить скорость истечения топливо-воздушной смеси из амбразуры до 20–40 м/с, преодолев этим один из самых существенных недостатков шахтно-мельничной топки — плохое заполнение топки факелом; при этом тракт аэросмеси, сепарационная шахта и мельница находятся под разрежением.

### *5) Рассредоточенный ввод воздуха в поток аэросмеси в виде системы параллельных плоских струй*

Прямоточные схемы изначально использовались в шахтно-мельничной топке, где весь поток угольной пыли и воздуха поступал в топку монолитным потоком через широкую амбразуру. Щелевые воздушные сопла обеспечивают:

- дробление потока воздуха, размывание целостного потока аэросмеси, способствуя формированию однородной топливо-воздушной смеси;
- сокращение протяженности факела.

Применение параллельных плоских струй стало конечным этапом развития шахтно-мельничных топок (рис. 9.6). Шахтно-мельничная топка — один из важных пройденных и по существу завершенных этапов в развитии факельного сжигания твердого топлива, образец последовательного улучшения технологии топливоиспользования.

Использованные в шахтно-мельничной топке оригинальные конструктивные решения получили в дальнейшем применение при разработке новых горелочных систем.

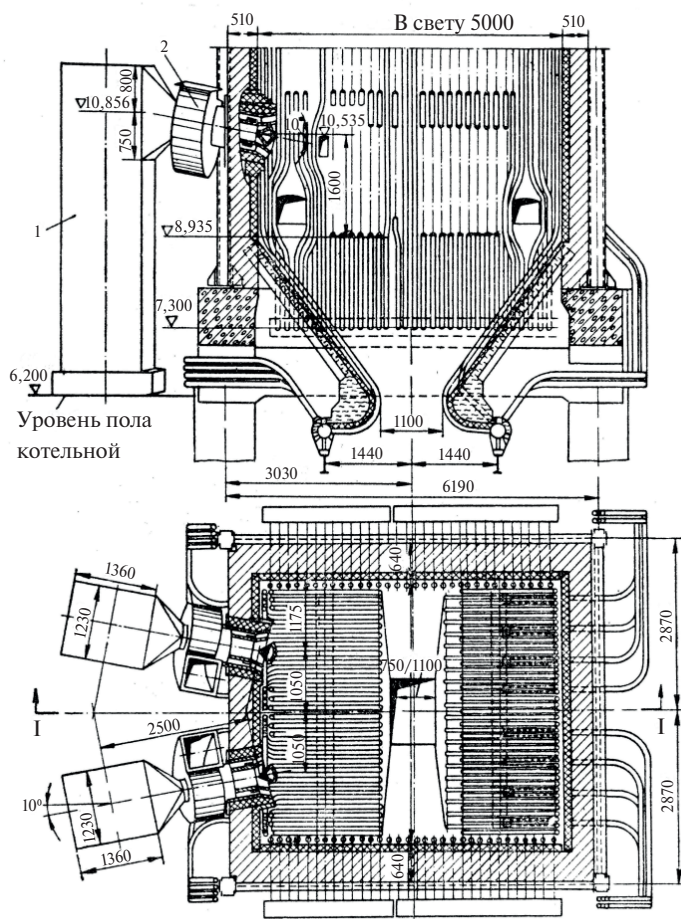


Рис. 9.6. Установка вихревых горелок ОРГРЭС в шахтно-мельничной топке:

1 — сепарационная шахта, 2 — горелка

Такой принцип дробления воздушного потока реализован в конструкции щелевых пылеугольных горелок МЭИ (рис. 9.7). В этих горелках для каменных и бурых углей для улучшения смешения вторичного воздуха с пылевоздушной смесью перегородки между каналами первичного и вторичного воздуха не доводят до выходного сечения, а выполняют короткими, создавая участок предварительного смешения. В случае необходимости усиления зажигания выходную часть горелки выполняют с плавным раскрытием для повышения устой-

чивости зажигания аэродинамическим торможением периферийных слоев [8].

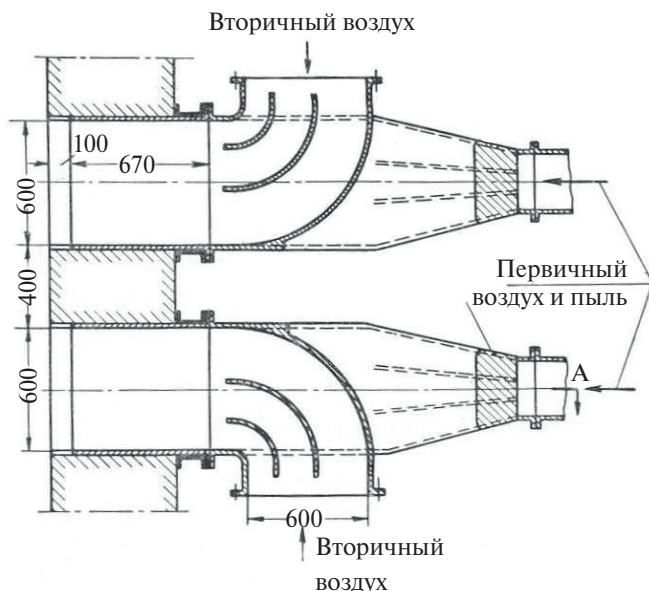


Рис. 9.7. Щелевая горелка МЭИ для сжигания угольной пыли в тонких плоских струях

Горелка предназначена для сжигания топлив как с малым, так и с большим выходом летучих.

К настоящему времени такие устройства практически вышли из употребления, уступив место вихревым пылеугольным горелкам.

#### **6) Смешение прямоточных потоков непосредственно в топке**

Ограниченные возможности прямоточных струй заставили привлекать вихревые процессы для интенсификации смешения. Решить эту задачу при сохранении начальной прямоточной структуры потоков топлива и воздуха удалось формированием единого центрального высокотурбулизованного вихревого потока. Все прямоточные потоки аэросмеси и вторичного воздуха перенесли сюда процессы смесеобразования, воспламенения и выгорания.

Эффективно использование прямоточных структур при тангенциальной компоновке угловых щелевых горелок, образующих цен-

тральный восходящий вихрь в виде спирали. В российской энергетике прямоточные угловые горелки с тангенциальной установкой уже использованы на котлах ПК-10 п-2 (1952 г.).

### *7) Многослойные щелевые горелочные устройства*

Для организации высокоэффективного сочетания свойств прямоточных струй и мощного вихревого потока были созданы мощные горелочные устройства с многослойными плоскими аэродинамическими структурами, вытянутыми по высоте (блочные горелки). Такая прямоточная горелка для высокореакционного топлива выполняется в различных модификациях:

- с чередующимися по высоте горизонтальными каналами;
- с чередующимися по высоте вертикальными каналами;
- с чередующимися по высоте вертикальными каналами и каналами рециркуляции (для сжигания бурых углей).

Для тангенциальной компоновки прямоточных горелок в топке используются только конструкции с односторонним подводом пылевоздушной смеси.

Эффективность таких мощных блочных горелок с угловой, тангенциальной компоновкой заключается в компактности систем подачи топлива и воздуха, организации по всей высоте горелочного блока постоянного аэродинамического импульса, поддерживающего центральный спиральный вихрь в топочной камере, в его устойчивости и мощности. В энергетике США, где используются в основном качественные высокореакционные топлива, такие прямоточные блочные горелки являются преобладающими (рис. 9.8).

### *8) Горелка плоскофакельная*

Подобный принцип сочетаний начальной прямоточной структуры и последующего образования вихревой структуры в топке, в которой и развиваются процессы смесеобразования и выгорания, осуществляется с помощью плоскофакельной горелки [9]. В самой горелке формируется пара прямоточных плоских потоков, которые после соударения под углом в топке образуют принципиально новые вихревые высокотурбулентные структуры. Задача самой горелки — выдать под заданным углом встречные потоки, а также обеспечить при этом начальное воспламенение топливо-воздушной смеси.



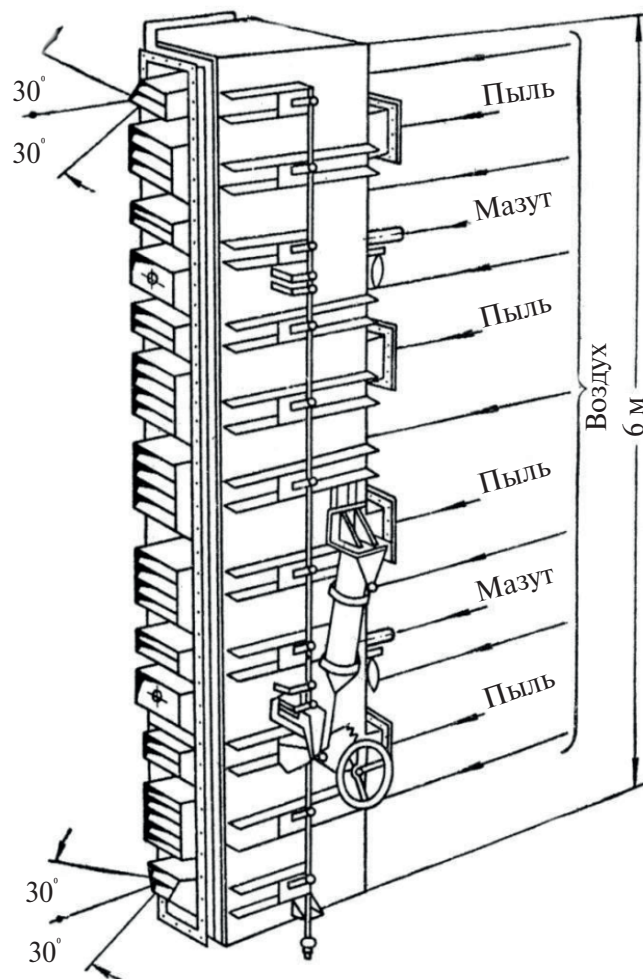


Рис. 9.8. Прямоточная блочно-щелевая горелка

Горелка на рис. 9.9 приспособлена для сжигания природного газа, угольной пыли и мазута. Она образована двумя коробами вторичного воздуха (круглого сечения диаметром 630 мм), оси которых составляют угол  $60^\circ$ , со встроенными в них газоподводящими трубами со струйными раздающими насадками, двумя трубопроводами аэросмеси диаметром 350 мм и центральной осевой мазутной горелкой. Для горелки выполнена разводка экранов на высоту до 2300 мм шириной 680 мм.



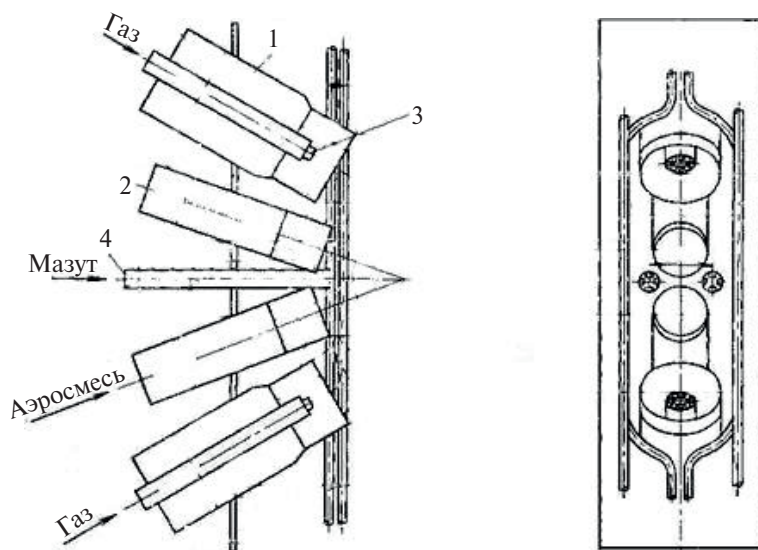


Рис. 9.9. Плоскофакельная горелка для котла 230 т/ч:

1 — короб вторичного воздуха; 2 — трубопровод аэросмеси; 3 — струйная насадка; 4 — мазутная горелка

Стабилизация факела в плоскофакельной горелке осуществляется совмещением принципов периферийного и внутреннего воспламенения и стабилизации факела. Два выходящих из горелки плоских потока воздуха, идущих на столкновение друг с другом под углом  $50\text{--}60^\circ$ , образуют треугольную полость, примыкающую основанием к торцу корпуса горелки и открытую с боков.

В этот «треугольник воспламенения» поступает топливо с первичным воздухом, к которому с торцов в зону разрежения подсасываются раскаленные топочные газы, обеспечивающие начальное воспламенение топливо-воздушной смеси. В отличие от прямоточных горелок, здесь реализуется механизм центрального воспламенения с очагом воспламенения в тыльной части факела. Этому способствует то, что факел оказывается несколько смещенным от плоскости выходного сечения горелки.

Опыт эксплуатации плоскофакельных горелочных устройств (25 лет) позволяет сформулировать обобщенную оценку их свойств:

- плоскофакельные горелки создают реальные возможности регулирования положения факела по высоте топки, размера активной лучевоспринимающей поверхности экранов;
- несколько улучшаются условия эвакуации из топки жидкого шлака;

- повышается маневренность котла, расширяется диапазон устойчивой работы, поддерживается расчетная температура перегретого пара на сниженных нагрузках.

Вместе с тем при работе котла ТПП-804 с плоскофакельными горелками на газе отмечалась неустойчивость воспламенения факела на срезе амбразуры, что приводило к отключению горелок системой контроля факела, имело место затягивание факела внутрь амбразуры на низких нагрузках, что приводило к разрушению горелок. Потребовалась реконструкция горелок с введением вихревых стабилизирующих элементов [10].

## 9.5. Вихревые горелки

---

Общий принцип вихревых горелок заключается в том, что в корпусе горелки горячий воздух получает крутку (улиточный вход, лопаточный завихритель аксиальный и радиальный), образуя на выходе в топку приосевую зону пониженного давления, в которую поступают топочные газы. Это зона обратных токов, или зона рециркуляции, которая служит стабилизатором факела, обеспечивая внутреннее поджигание закрученной струи топливо-воздушной смеси. Многообразие конструкций пылеугольных и газовых вихревых горелок соответствует широкому спектру топлив, используемых в российской энергетике.

Основные параметры вихревой горелки:

- способ и показатель крутки потоков воздуха (и аэросмеси в пылеугольной горелке);
- скорости закрученных потоков горячего воздуха, аэросмеси и их соотношение;
- способ подвода, раздачи и распределения топлива.

Существующими рекомендациями установлены оптимальные значения этих параметров для конкретных топлив, горелочных устройств определенной мощности [11–15].

Основные задачи, решаемые в современных и реконструируемых вихревых горелках:

- регулирование интенсивности смесеобразования;
- повышение эффективности стабилизации факела при замедленном смесеобразовании путем воздействия на воспламеняющую способность рециркулирующих продуктов сгорания в зоне обратных токов;

— возможность регулирования положения факела аэродинамическими методами в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

## 9.6. Сравнительный анализ эффективности прямоточных и вихревых горелок

Современная концепция организации топочного процесса предусматривает приоритет прямоточных угловых горелок в мощных топках с организацией соответствующей вихревой структуры потока топочных газов. Однако в отечественных крупных котлах блоков 300, 500 и 800 МВт (ПК-39, П-57, П-67, ТГМП-204ХЛ) используются вихревые горелки в количестве до 40 единиц с настенной встречной многоярусной компоновкой.

Сравнение эффективности прямоточных и вихревых горелок приведено в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Сравнение эффективности прямоточных и вихревых горелок

Структура потока в горелке	Достоинства конструкции	Недостатки конструкции
Прямоточная	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конструктивно просты, по сравнению с вихревыми горелками;</li> <li>2. Имеют меньшее аэродинамическое сопротивление, чем вихревые горелки, следовательно, меньший расход электроэнергии на собственные нужды;</li> <li>3. Меньший выход оксидов азота, чем у топок с вихревыми горелками;</li> <li>4. Возможность компактной установки горелок по углам топки;</li> <li>5. Способность формировать единый вихревой поток топочных газов (тангенциальная, концентричная структура факела);</li> <li>6. Большая дальнобойность, чем у вихревых горелок</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Худшая, чем в вихревых, организация перемешивания потока;</li> <li>2. Меньшая единичная мощность;</li> <li>3. Большее влияние на показатели способа компоновки горелок в топке;</li> <li>4. Стабилизация процесса горения в основном протекает за счет внешней эжекции продуктов сгорания;</li> <li>5. Менее универсальны по топливу</li> </ol>

Окончание табл. 9.1

Структура потока в горелке	Достоинства конструкции	Недостатки конструкции
Вихревая	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обеспечивает приосевую и периферийную зону рециркуляции для стабилизации и надежного воспламенения факела;</li> <li>2. Интенсивное смесеобразование, приводящее к улучшению выгорания топлива и сокращению длины факела;</li> <li>3. Пригодность для сжигания низкокачественных топлив;</li> <li>4. Большая единичная мощность, возможность совмещения в одном корпусе двух горелок (сдвоенные горелки)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Малая дальностью струи, факела;</li> <li>2. Интенсивное смесеобразование, приводящее к увеличенному выходу оксидов азота;</li> <li>3. Повышенное гидравлическое сопротивление горелки;</li> <li>4. Большое число горелок в мощных топках со сложными разводками экранов, загромождение зоны обслуживания воздухоподводами, топливоподающими коробами</li> </ol>

## 9.7. Прямоточно-вихревые горелки

В огромном множестве горелок энергетических котлов различных параметров, работающих на различных топливах, реализуется сочетание прямоточных и вихревых структур: часть потоков вводится в топку по прямоточным каналам, часть — в виде вихревого потока.

В газомазутных горелках воспламенение и стабилизация факела осуществляется вихревой приосевой частью потока, а предупреждение образования оксидов азота организуется за счет прямоточного ввода основной части воздуха по одному или двум концентричным каналам. При наличии двух прямоточных каналов воздуха периферийный поток воздуха выполняет также функцию поддержания оптимальной скорости вторичного воздуха в зоне горения путем уменьшения этой части воздуха по мере снижения нагрузки.

В пылеугольных прямоточно-вихревых горелках (рис. 9.10, 9.11) центральный (приосевой) поток аэросмеси выполняется прямоточным с рассекателем на выходе, вторичный воздух получает крутку на входе

в корпус горелки или непосредственно в кольцевом канале, перед выходом в топку. Такая схема организации факела является в настоящее время преобладающей, большая часть паровых и водогрейных котлов оснащена подобными горелками.

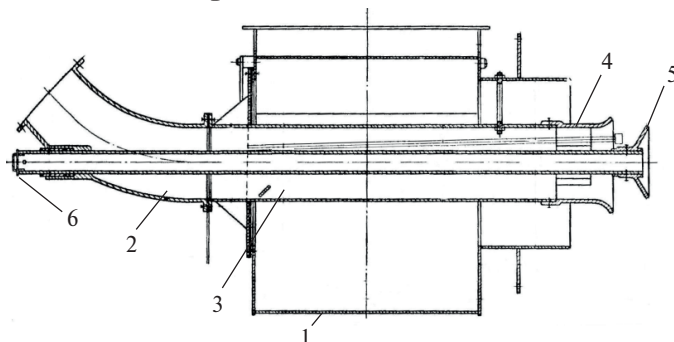


Рис. 9.10. Горелка ОРГРЭС с конусом-рассекателем в канале аэросмеси:  
1 — улитка вторичного воздуха; 2 — патрубок аэросмеси; 3 — канал аэросмеси в корпусе горелки; 4 — опорная втулка; 5 — конус-рассекатель; 6 — управление перемещением конуса

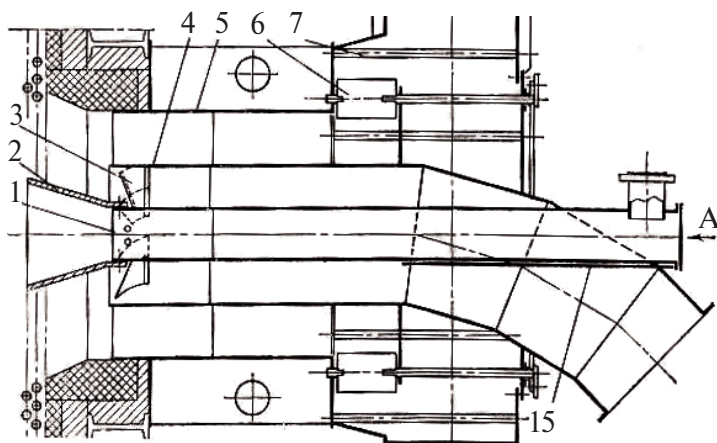


Рис. 9.11. Пылеугольная горелка котла П-57 блока 500 МВт (экибастузский уголь):  
1 — центральная труба; 2 — конус центральной трубы; 3 — осевой лопаточный аппарат; 4 — труба первичного воздуха; 5 — короб вторичного воздуха; 6 — тангенциальный лопаточный завихритель; 7 — дистанционирующие трубы

При сжигании наиболее трудного для воспламенения топлива — антрацита АШ — угол раскрытия прямого потока аэросмеси при обтекании конуса составляет  $120^\circ$ . Конус-рассекатель используется в настоящее время в мощных горелках — прямоочных и вихре-

вых — как дополнительное средство повышения устойчивости горения тощих углей и близких к ним экибастузских углей. В котлах П-57, ПК-39 конус устанавливается на выходе в топку аэросмеси, получившей закрутку в лопаточном аксиальном аппарате.

## 9.8. Конструктивные способы совмещения в горелке прямоточных и вихревых принципов формирования факела

Многообразие конструктивных решений прямоточно-вихревых горелок не всегда связано с объективными специфическими условиями сжигания топлива в топке энергетического котла. Поиски зачастую сводятся к перебору известного ограниченного набора аэродинамических структур и числа кольцевых каналов в горелке. Не всегда принятию решений предшествуют стендовые испытания горелок, их отработка на стендах, доводка конструкции в реальных условиях на действующих котлах. Основные мировые и отечественные производители энергооборудования имеют горячие стенды для исследования полноразмерных горелок на расчетном топливе.

На рис. 9.12–9.15 приведены примеры различных комбинаций прямоточных и вихревых потоков в реальных горелочных устройствах на газомазутном и твердом топливе.

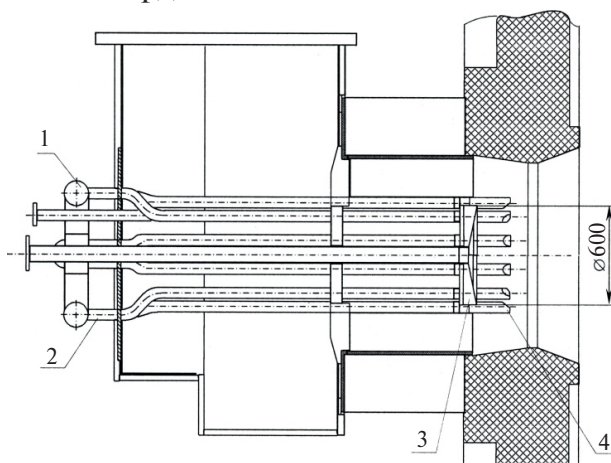


Рис. 9.12. Горелка прямоточно-вихревая газомазутная типа ГМПВ «Экотоп» с закрученным центральным потоком и прямоточным периферийным:

- 1 — газовый коллектор; 2 — газораздающие трубы; 3 — аксиальный завихритель;  
4 — газовый насадок

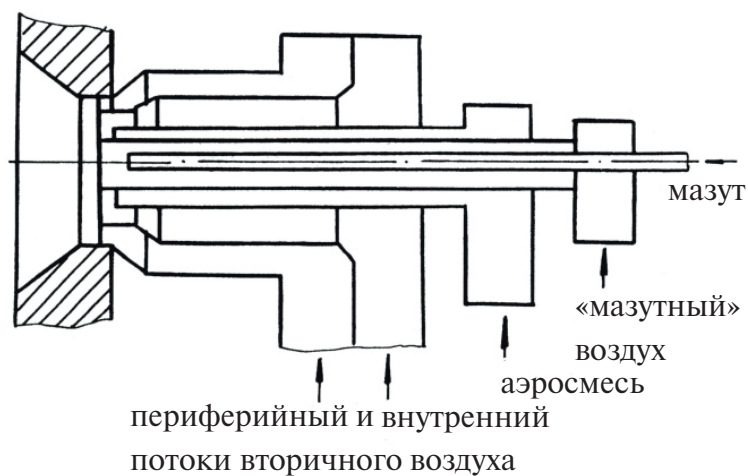


Рис. 9.13. Горелка прямоточно-вихревая с двумя прямоточными каналами вторичного воздуха

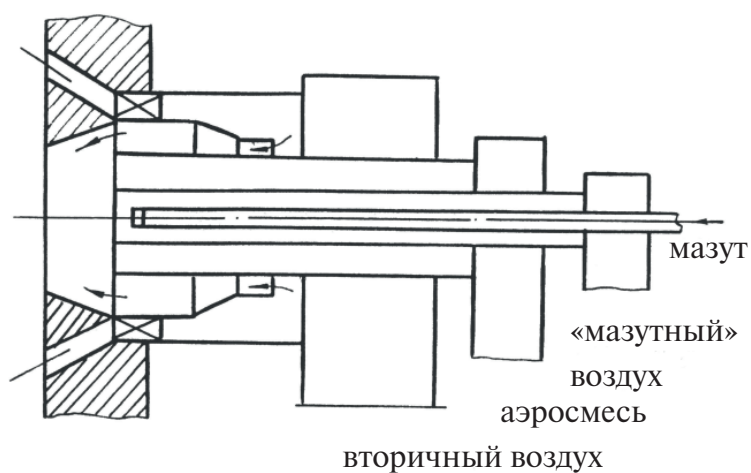


Рис. 9.14. Горелка прямоточно-вихревая пылеугольная с закруткой периферийного потока вторичного воздуха



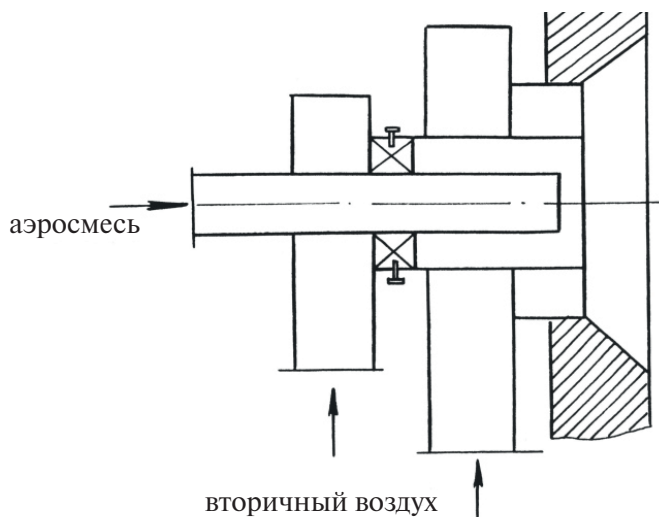


Рис. 9.15. Горелка прямоточно-вихревая пылеугольная с периферийным прямоточным каналом вторичного воздуха и внутренним каналом вторичного воздуха с закруткой

## 9.9. Конструктивные особенности подовых газомазутных прямоточно-вихревых горелок

Эффективное и необходимое сочетание прямоточных и вихревых потоков осуществлено в подовых газомазутных горелках. Конструктивные особенности подовых горелок и их показатели соответствуют специфическим условиям организации горения в топках с подовой компоновкой горелок.

Горелочное устройство (рис. 9.16) состоит из четырех воздушных каналов и отдельного канала для дымовых газов системы рециркуляции. На входе во внутренний кольцевой воздушный канал установлен тангенциальный завихритель, в остальных периферийных каналах первоначально установленные аксиальные завихрители демонтированы. Подвод воздуха и газов рециркуляции выполнен отдельно к каждой из 12 подовых горелок с уникально высокой производительностью по мазуту — 12,7 т/ч. Горелка по аэродинамической структуре является прямоточно-вихревой. Она образует два приосевых вихревых потока, два коаксиальных прямоточных воздушных потока и периферийный прямоточный кольцевой поток газов рециркуляции.

Условия работы подовой горелки определили целесообразность выполнения многоканальной конструкции для регулирования расхода го-

рячего воздуха по каждому из них. Это позволяет сохранять стабильность каждого отдельного мазутного факела за счет газо-воздушной четырехслойной кольцевой оболочки, поддерживать определенную динамику тепловыделения, регулируя распределение воздуха по каналам.

Такая конструкция подовой горелки обеспечивает:

- снижение максимальной температуры факела за счет растягивания его по высоте топки;
- возможность снижения избытка воздуха в факеле с 1,05 до 1,01;
- снижение выбросов оксидов азота;
- снижение локальных тепловых потоков в зоне НРЧ и температуры металла труб экранов НРЧ;
- исключение формирования восстановительной коррозионно опасной среды в пристенной зоне.

Длительный опыт использования таких конструкций подовых горелок подтвердил их эффективность и надежность.

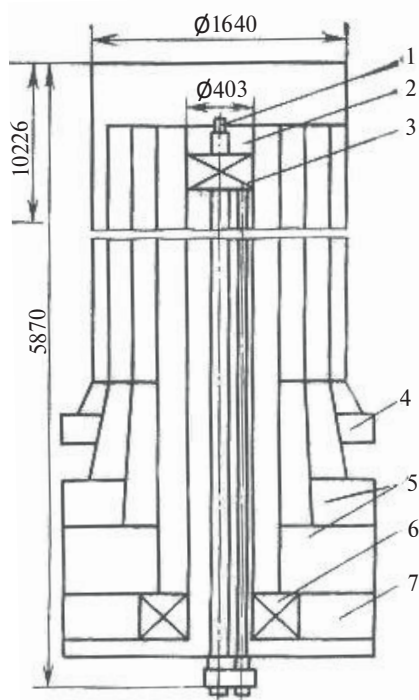


Рис. 9.16. Газомазутная подовая горелка конструкции УралОРГРЭС (Рязанская ГРЭС) [16]:

- 1 — форсунка, 2 — внутренний воздушный канал, 3 — аксиальный завихритель, 4 — канал газов рециркуляции, 5 — периферийные воздушные каналы, 6 — неподвижный тангенциальный лопаточный завихритель, 7 — центральный канал для воздуха при работе на мазуте

### **9.10. Струйно-стабилизаторные горелки как сочетание прямоточной и вихревой структуры факела**

---

Стабилизация пламени с использованием плохобтекаемых тел позволяет обеспечить устойчивый процесс диффузионного горения в потоке, движущемся со скоростью до 100 м/с и более, в потоке с неограниченно большим избытком воздуха, с саморегулированием локального избытка воздуха в факеле. Струйно-стабилизаторная горелка представляет особый класс комбинированных прямоточно-вихревых горелок [17]. В отличие от представленных выше прямоточно-вихревых горелок, здесь нет потоков различной аэродинамической структуры, в зону горения воздух поступает прямотоком, а прямоточные газовые струи подаются перпендикулярно потоку воздуха под прикрытием уголковой (желобообразной) конструкции. Воспламенение, диффузионное горение газовых струй осуществляется в рециркуляционных вихревых зонах за желобообразными стабилизаторами.

Высокая турбулентность в аэродинамической тени уголкового стабилизатора обеспечивает интенсивное перемешивание и горение. Режим горения приближается к кинетическому. При изменении скорости газовой струй, ее дальноточности автоматически изменяется количество воздуха, участвующего в смесеобразовании и горении, что обеспечивает саморегулирование процесса горения и устойчивость факела в широком диапазоне избытка воздуха. Струйно-стабилизаторные горелки используются и в других агрегатах, например:

- для подогрева отходящих газозоудушных потоков после газовой турбины ПГУ для повышения температуры смеси перед котлом-утилизатором, генерирующим пар для паровой турбины (утилизационная схема) [18];
- для подогрева отходящих газов ГТУ на входе в топку парового котла (в ПГУ по сбросной схеме);
- для низкотемпературного подогрева больших масс воздуха в системе вентиляции, в тепловых завесах; сушильных устройствах (в частности, для увеличения степени сушки топлива и повышения производительности мельницы ШБМ).

Струйно-стабилизаторная горелка может быть выполнена из отдельного уголкового линейного обтекателя с торцевым вводом газовой струи. Из таких модулей может набираться составное горелочное устройство в виде ряда параллельных элементов с общим газоподающим перфорированным коллектором. Используются и радиальные конструкции с центральным газоподающим устройством со струйным насадком, к которому примыкают радиальные стабилизирующие элементы, например уголковые, в тени которых развиваются газовые струи. Одна из модификаций струйно-стабилизаторной горелки предусматривает использование вместо ряда уголковых стабилизаторов перфорированного диска или конуса, охватывающего сечение канала нагреваемой среды (рис. 9.17, 9.18). Здесь газовая струя развивается по радиусу вдоль затененного сектора между радиальными рядами отверстий для прохода воздуха.

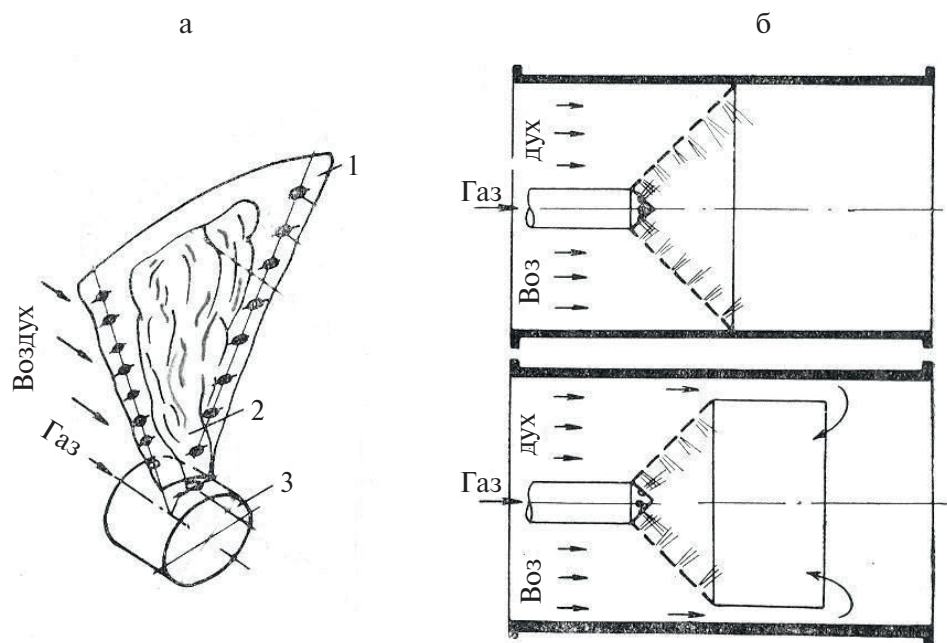


Рис. 9.17. Струйно-стабилизаторная горелка с торцевой и конической перфорированной воздухораспределительной решеткой:

а — с торцевой решеткой; б — с конической решеткой;

1 — воздухораспределительная решетка, 2 — факел,

3 — коллектор подачи газа

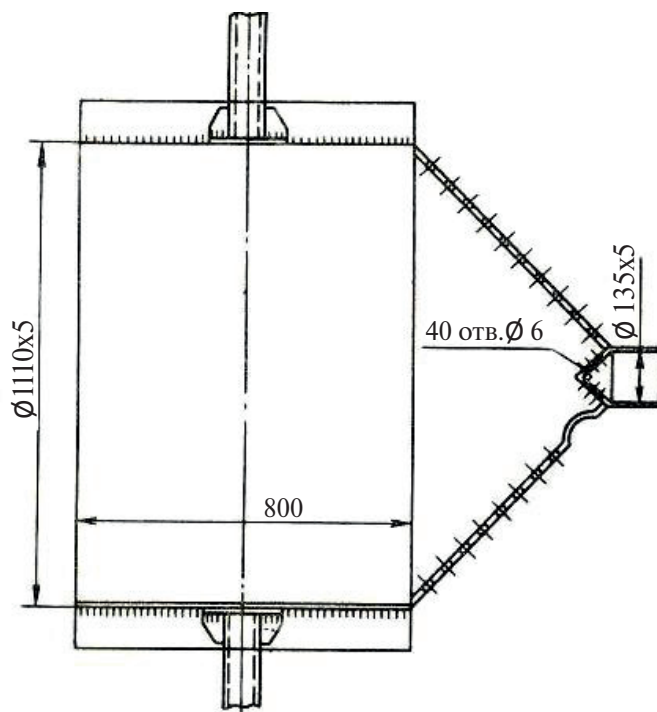


Рис. 9.18. Струйно-стабилизаторная горелка для подогрева сушильного агента перед мельницей

## 9.11. Конструктивные особенности газогорелочных устройств

---

### 9.11.1. Основные типы газогорелочных устройств, применяемые в отрасли

В методических указаниях [19] отмечается, что применяемые в топках энергетических котлов газовые горелки представляют собой дутьевые горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного перемешивания горючего газа с воздухом. Со временем, в результате унификации технологических и экологических требований, с ростом единичной мощности котлов и сокращением их номенклатуры, происходит сокращение многообразия конструкций газовых горелок. Утрачена актуальность подовых газомазутных горелок, одноканальных газовых горелок, плоскофакельных горелок.

Наиболее характерные решения в современных конструкциях горелок энергетических котлов:

*вихревые горелки на природном газе:*

- прямоточно-вихревые воздушные каналы;
- струйная раздача газа в поток воздуха с помощью системы газоподводящих труб, проложенных в корпусе горелки вдоль воздушного канала;
- в зависимости от мощности горелки используется периферийная, центральная, комбинированная центральная и периферийная, промежуточная между потоками воздуха раздача газа;
- двухколлекторная система ввода газа в горелку;

*прямоточные газовые горелки:*

угловые плоско-щелевые горелки (впервые использованы в российской энергетике на котлах ПК-10 п-2 (1952 г.) в топках тангенциального типа).

### **9.11.2. Особенности формирования газового факела в энергетических котлах**

Общие свойства всех используемых в энергетике горелочных устройств, рассчитанных на сжигание природного газа в диффузионном факеле, отражают специфические свойства данного топлива, физическую сущность процессов его горения:

- 1) струйный ввод газа в поток воздуха, обеспечивающий первый этап — формирование горючей смеси — макросмешение;
- 2) фактическая скорость горения совпадает со скоростью образования газозвоздушной смеси;
- 3) отсутствие фазовых переходов в процессе сжигания топлива;
- 4) полная готовность топлива к химической реакции с молекулами кислорода воздуха без специальной подготовки при соблюдении одного из условий: либо наличия достаточно высокой температуры для самовоспламенения, либо наличия стороннего локального источника высокой температуры (искровой или плазменный запальник);
- 5) практически полное отсутствие физического недожога в топочном процессе;
- 6) несовершенное смесеобразование — единственный источник химического недожога;
- 7) формирование горючей топливо-воздушной смеси из всего поданного количества реагентов идет постепенно. Первоначально сложившийся готовый к воспламенению объем смеси — первичная

смесь — распространяет горение на весь поток топливо-воздушной смеси. Для скорейшего формирования зоны первичного воспламенения следует ограничивать поступление реагентов в первичный участок факела;

8) смесеобразование в диффузионном факеле происходит одновременно с протеканием процессов горения, развивающихся при формировании горючей смеси;

9) для прямоточных и вихревых горелок основная часть длины факела приходится на зону догорания (около 2 % топлива).

Формирование газозадушной горючей смеси в горелках диффузионного типа начинается непосредственно в полости горелки, где струи газа внедряются в поток воздуха. На выходе из горелки складывается определенный объем горючей смеси, который служит очагом начального воспламенения. Формирование основной массы горючей смеси завершится в топке в результате крупномасштабного турбулентного массообменного процесса.

В газовой горелке реализуются различные способы струйной раздачи газа в поток воздуха — периферийный, центральный. Технологические приемы здесь достаточно отработаны, сложилась методика расчета струйного смешения, отраженная в отраслевых методических материалах.

Изменение со временем требований к условиям сжигания природного газа — ужесточение экологических требований (ограничение выбросов оксидов азота, бенз (а)пирена: шумовые характеристики), устойчивость факела, надежность конструкции, специфические условия сжигания — все это определяет неизбежность дальнейшего совершенствования конструкции газовых горелок для энергетических котлов, а также для котлов-утилизаторов ГТУ.

Излагаемый ниже материал имеет целью подчеркнуть физическую обоснованность тех или иных конструктивных решений, механизмы их воздействия на процессы формирования факела, что позволяет обоснованно осуществлять выбор и эксплуатацию горелочного устройства для конкретных условий.

### **9.11.3. Условия организации факела технологических газов**

Современная энергетика все в большей мере включает в состав топливного баланса технологические газы — доменный, коксовый, генераторный газы, шахтный метан, попутные нефтегазы, биогаз и другие.



Предусматривается их сжигание на типовых газомазутных энергетических котлах.

На ТЭС сжигание низкокалорийных газов от доменного производства осуществляется отдельно либо совместно с природным газом в одной и той же горелке. Существенным при создании конструкции горелочного устройства является не только низкая удельная теплота сгорания газа —  $4200\text{--}4600\text{ кДж/м}^3$ , но и нестабильность состава смеси сжигаемых газов. Для стабилизации тепловой нагрузки горелки необходима система автоматического регулирования подачи природного газа. Такие комбинированные горелки реализуют следующие основные принципы:

- закрутка горячего воздуха на входе в горелку;
- струйный вдув поперечными струями в поток воздуха;
- ввод доменного газа прямоточным каналом спутно с воздушным потоком.

По известным рекомендациям [20] доменный газ должен сжигаться всегда отдельно от других топлив, специальные горелки для него следует устанавливать в нижней части топки. Подсветка факела доменного газа должна осуществляться коксовым газом.

Более совершенной представляется конструкция универсальной горелки для сжигания низкокалорийного газа — доменного, генераторного (рис. 9.19) [21].

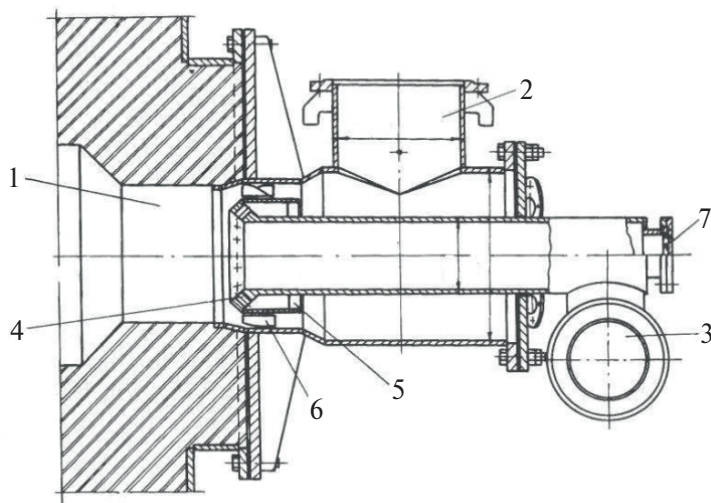


Рис. 9.19. Горелка низкокалорийного газа:

1 — амбразура, 2 — воздушный патрубок, 3 — газовый патрубок, 4 — газовое сопло, 5 — втулка, 6 — завихритель, 7 — гляделка

В этой конструкции учитывается загрязненность технологических газов, которая приводит к отложениям по всему газовому тракту: в газораздающих соплах, отверстиях, что вызывает их перекрытие. Из горелки газ поступает в топку без дробления его на отдельные струи, единым потоком по центральному каналу диаметром 150 мм. Воздух в горелке разделяется на основной периферийный вихревой поток и внутренний поток, поступающий на смешение с газом в виде отдельных струй под углом к оси горелки. Воздушные струи выполняют также функции стабилизаторов пламени.

Практический опыт показывает, что горелка мощностью от 50 до 850 м<sup>3</sup>/ч обеспечивает качественное сжигание низкокалорийного газа с теплотой сгорания от 8 до 15 МДж/нм<sup>3</sup>.

## **9.12. Конструктивные принципы пылеугольных горелок**

---

Исходные требования к пылеугольным горелкам предусматривают широкий спектр условий и ограничений, учитывающих особенности процессов горения угольной пыли, характеристики используемого топлива, конструкцию топочной камеры. Это такие требования, как:

- возможность колебаний состава топлива в определенном диапазоне;
- возможность длительной работы на резервном топливе;
- доля первичного воздуха должна соответствовать его потребности для воспламенения и сжигания летучих;
- ограничение образования вредных веществ — оксиды азота, окись углерода;
- ограничение образования коррозионноопасных веществ — SO<sub>3</sub>;
- исключение сепарации топливных частиц из факела;
- надежность конструкции горелки — отсутствие термических и эрозионных повреждений, шлакования амбразуры;
- минимизация механического и химического недожога;

- надежность зажигания факела в каждой горелке.

При этом конструктивные способы решения этого круга задач различны. Возможные решения приведены в нормативных и методических документах [14; 19; 22].

### **9.13. Конструктивные принципы горелок, комбинированных по топливу**

---

Возможность совместного (попеременного) сжигания в одной горелке природного газа и угольной пыли соответствует реальным условиям эксплуатации электростанций, имеющих отводы от магистральных газопроводов и оборудование для приема и использования угля. Это связано не только с сезонными ограничениями в подаче природного газа, но также с условиями безопасности и стабильности энергоснабжения потребителей. В итоге обеспечивается свобода маневра для ТЭС в условиях неопределенности формирования структуры топливного баланса. Комбинированная горелка должна соответствовать всем требованиям, предъявляемым газовым и пылеугольным горелкам в отдельности. Необходимо также обеспечить возможность перехода с одного вида топлива на другой без отключения горелки и разгрузки котла.

На рис. 9.20 представлена пылегазовая горелка котла ПК-57 (разработка УралОРГРЭС). Горелка содержит два concentричных канала вторичного воздуха и две группы газораздающих устройств (центральная и промежуточная раздача газа) с двумя автономными наружными газовыми коллекторами. Газоподводящие трубы наружного раздающего узла на всем их протяжении внутри горелки закрыты от аэродинамического воздействия потоков горячего воздуха металлическими кольцевыми кожухами. Газораздающие перфорированные насадки обеспечивают выход газовых струй в радиальном направлении к внешнему и внутреннему потокам вторичного воздуха. Газоподводящие трубы внутреннего узла проложены в центральной, т. н. «мазутной» трубе по внутренней ее поверхности. Осуществляется веерная раздача топливного газа.

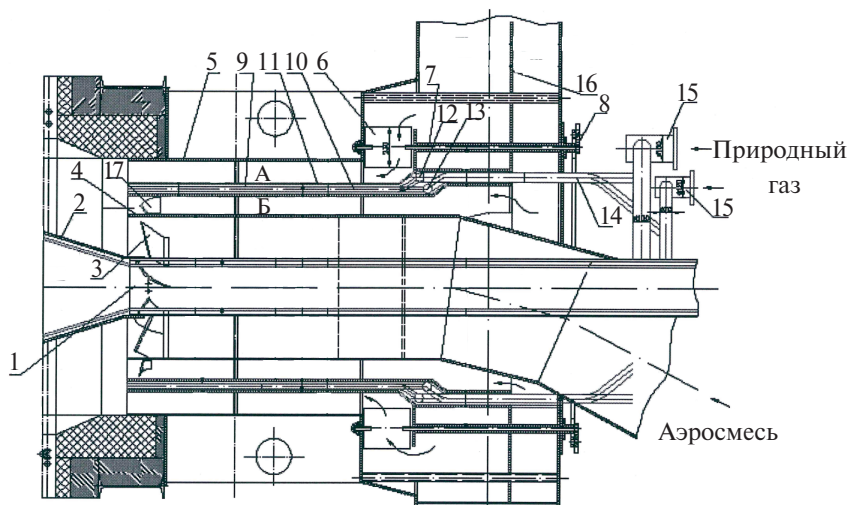


Рис. 9.20. Конструктивная схема пылегазовой горелки котла П-57:

А — наружный канал вторичного воздуха; Б — внутренний канал вторичного воздуха;

1 — центральная труба; 2 — конус центральной трубы; 3 — осевой лопаточный аппарат; 4 — труба первичного воздуха; 5 — короб вторичного воздуха; 6 — тангенциальный лопаточный завихритель; 7 — дистанцирующие трубы; 8 — кольцо привода лопаток; 9 — кольцевая разделительная перегородка; 10 — газораздающие трубки; 11 — кожух; 12 — основная распределительная труба; 13 — вспомогательная распределительная труба; 14 — газоподающие трубы; 15 — газовый коллектор; 16 — разделительная перегородка подводящего патрубка; 17 — лопатки осевого завихрителя внутреннего канала вторичного воздуха

## 9.14. Экологически ориентированные конструкции горелок

### 9.14.1. Основные направления улучшения экологических показателей газогорелочных устройств

Приоритетным направлением в экологизации топочно-горелочных устройств является создание конструкций горелок со сниженным выходом оксидов азота. В них осуществляется различными конструктивными приемами направленное воздействие на процессы смешения и горения. Экологический эффект достигается:

- при сжигании угля — за счет выделения основной массы связанного азота топлива в среде, обедненной окислителем, и, соответственно, снижения топливных оксидов азота;

- при сжигании природного газа — за счет снижения температурного уровня процесса;
- при растягивании тепловыделения по высоте топочной камеры и соответствующего уменьшения выхода воздушных оксидов азота [23].

При создании конструкции горелок с направленным воздействием на механизмы образования оксидов азота непосредственно в факеле предусматривается реализация комплекса следующих основных требований:

- 1) воспламенение и выгорание основной массы топлива до завершения смешения со вторичным воздухом;
- 2) сокращение времени пребывания азотообразующих компонентов в высокотемпературной зоне;
- 3) снижение температуры в начальном участке факела (ввод газов рециркуляции в корень факела, интенсификация теплоотвода в начальном участке факела);
- 4) снижение избытка воздуха в факеле;
- 5) отсутствие преждевременного полного смешения первичного воздуха со вторичным, что благоприятно сказывается и на воспламенении;
- 6) подача первичного воздуха в количестве, необходимом только для выгорания летучих;
- 7) высокая интенсивность циркуляции топочных газов к корню факела (в зоне воспламенения) за счет рационального сочетания с конструкцией топочной камеры;
- 8) разбавление воздуха присадкой инертных газов;
- 9) введение промежуточной инертной среды в многоканальной горелке, разделяющей потоки горячего воздуха.

На этой основе созданы многочисленные конструкции малотоксичных горелок, обеспечивающие снижение выхода оксидов азота до 350–400 мг/м<sup>3</sup> в пылеугольных котлах и до 120–180 мг/м<sup>3</sup> при сжигании природного газа. В результате этого многолетнего процесса определились оптимальные конструктивные решения газовых, мазутных и пылеугольных горелок, а также режимы их работы.

Можно выделить следующие горелочные устройства с высокими экологическими показателями, получившие практическое применение в отрасли:

- газомазутные с двумя каналами горячего воздуха;

- пылеугольные двухканальные по вторичному воздуху;
- пылеугольные со встроенным узлом предварительного подогрева пыли;
- вихревые с регулированием газового факела струйным вводом по периферии;
- пылеугольные с разделением потока вторичного воздуха промежуточным непроточным каналом;
- пылеугольные для сжигания высококонцентрированной аэро-смеси;
- пылеугольные с локальной концентрированной подачей топлива в поток воздуха с формированием заданной неравномерности состава смеси;
- газомазутные горелки с вводом рециркулирующих дымовых газов.

В основу всех этих конструктивных решений положены принципы управляемого замедления процесса смесеобразования, выгорания топлива, снижения температурного уровня процесса, снижения скорости горения в кинетической области в зонах завершённого смесеобразования (разбавлением окислителя инертными газами).

В результате ограничивается образование «быстрых» оксидов азота (механизм Фенимора) в газовом и пылеугольном факеле, «топливных» оксидов азота в пылеугольном факеле и одновременно «воздушных» оксидов при сжигании различных видов топлива.

#### **9.14.2. Пылеугольные вихревые горелки с замедленным смешением аэроsmеси и вторичного воздуха**

Процесс подготовки топлива к воспламенению на участке от среза горелки до фронта пламени осуществляется в результате поперечного турбулентного массообмена между спутными потоками вторичного воздуха и аэроsmеси. Интенсивность поперечного массообмена на границе между ними определяется режимом течения и геометрическими характеристиками выдающего канала. Регулируя интенсивность этого процесса, можно, затягивая смесеобразование, обеспечить прогрев и газификацию угольных частиц с выделением связанного азота топлива в зоне с избытком воздуха существенно ниже стехиометрического, что ограничивает образование «топливных» оксидов.

Одним из эффективных способов воздействия на образование оксидов азота в пылеугольном факеле является торможение процесса смешения аэросмеси со вторичным воздухом, который успешно реализуется в прямоточных горелках при наличии спутных линейных потоков. В вихревых горелках при высокой степени турбулизации спутных концентричных закрученных потоков ограничение интенсивности поперечного турбулентного массообмена между потоками аэросмеси и вторичного воздуха требует специальных решений конструктивного и режимного порядка. Здесь можно выделить следующие основные приемы:

- 1) переход от горелочных устройств с чисто вихревой аэродинамикой к прямоточно-вихревой аэродинамической структуре факела;
- 2) механическое разделение потоков аэросмеси и вторичного воздуха с помощью перегородок, исключающих взаимодействие по всей длине изолированных каналов горелки вплоть до выхода в топку;
- 3) пространственное разделение потоков аэросмеси и вторичного воздуха в прямоточных и вихревых горелках;
- 4) дискретный ввод аэросмеси в топку в виде системы изолированных струй (вместо характерного для вихревых горелок кольцевого потока аэросмеси);
- 5) аэродинамическое регулирование интенсивности смешения потоков аэросмеси и вторичного воздуха путем оптимизации скоростного режима горелки;
- 6) двухканальные по воздуху пылеугольные горелки.

### **9.14.3. Переход от вихревых к прямоточно-вихревым горелкам**

Практический опыт развития конструкции пылеугольных горелок показал, что переход от вихревых к прямоточно-вихревым горелкам сопровождается по крайней мере двукратным снижением выхода оксидов азота.

На котлах типа ПК-14 достигаемое снижение недожога (весьма незначительное) при переходе от прямоточных горелок ВНИИТМ-УО ОРГРЭС к вихревым горелкам ОРГРЭС сопровождалось более чем двукратным возрастанием концентрации оксидов азота в дымовых газах. Показателен эффект перехода от вихревых к прямоточно-



вихревым газовым горелкам на котле ТГ-104 [24]. Здесь двенадцать вихревых двухканальных горелок конструкции ТКЗ, размещенных в два яруса на фронтном экране, были заменены малотоксичными прямоточно-вихревыми горелками типа ГМПВ «ЭКОТОП» (рис. 9.12). Переход от горелочных устройств с чисто вихревой аэродинамикой к прямоточно-вихревой позволил снизить концентрацию  $\text{NO}_x$  в 2,0–2,5 раза.

#### 9.14.4. Горелки ступенчатого сжигания

Применение горелок ступенчатого сжигания, кроме решения экологических задач, позволяет обеспечить возможность экономичной и устойчивой работы на сниженных нагрузках благодаря наличию двух изолированных концентрических или смежных каналов с разделительными подводами. При пониженной нагрузке уменьшается подача воздуха на периферийный канал при сохранении расчетной скорости воздуха на выходе из внутреннего канала. Кроме того, разделение закрученного потока воздуха кольцевой перегородкой предотвращает смещение основной части воздуха к периферии, то есть способствует равномерному распределению воздуха по сечению амбразуры. Это позволяет наращивать единичную мощность горелочного устройства.

Ступенчатое сжигание, как способ подавления выбросов оксидов азота, реализуется не только в топочном процессе в качестве внутри-топочного мероприятия, но также и направленным формированием структуры факела в горелке. Здесь ступенчатое сжигание осуществляется последовательным, ступенчатым включением обоих разделенных потоков воздуха в смесеобразование и, соответственно, замедлением процесса выгорания большей части топлива при недостатке воздуха ( $\alpha \approx 0,7–0,8$ ). В результате снижается максимальная температура факела, снижается интенсивность окисления азота воздуха. За счет выделения основной массы азотсодержащих веществ топлива в среде с минимальной концентрацией кислорода осуществляется переход выделяющегося атомарного азота в молекулярный азот. Конструкция горелки должна обеспечивать интенсивное завершение процессов смесеобразования и выгорания топлива на последующем этапе.

Совмещение указанных разнонаправленных функций двухканальных горелок (расширение диапазона эффективной работы при сниже-

нии нагрузки и ограничение вредных выбросов) возможно при наличии отдельного регулируемого подвода воздуха в каждый из каналов воздуха (рис. 9.21).

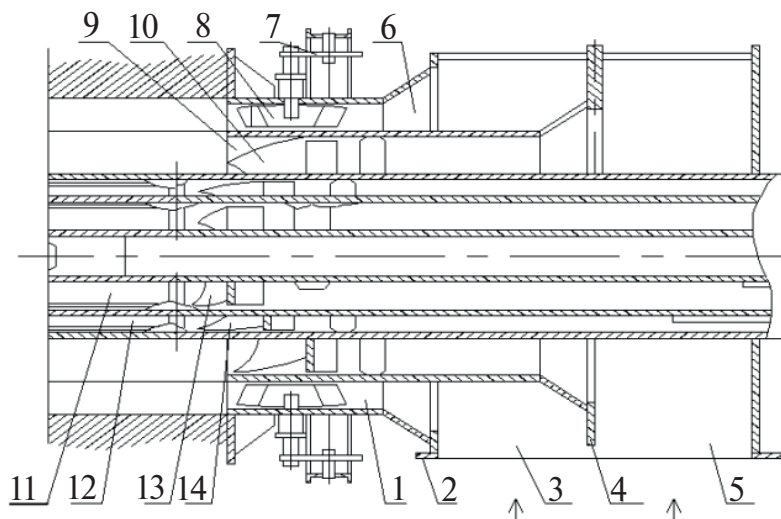


Рис. 9.21. Пылеугольная вихревая горелка с двумя каналами вторичного воздуха, регулируемым лопаточным аппаратом внешнего канала:

1 — канал внешнего потока вторичного воздуха; 2 — подводящий короб внешнего потока вторичного воздуха; 3 — внешний поток вторичного воздуха; 4 — разделительная перегородка; 5 — внутренний поток вторичного воздуха; 6 — переходный канал; 7 — механизм поворота лопаток переходного канала вторичного воздуха; 8 — поворотные лопатки внешнего вторичного воздуха; 9 — закрутка внутреннего потока вторичного воздуха; 10 — неподвижные лопатки осевого завихрителя внутреннего потока вторичного воздуха; 11, 12 — каналы для подвода охлаждающего воздуха; 13, 14 — лопатки для закрутки потоков охлаждающего воздуха

В определенной мере отсутствие отдельных вводов должно быть компенсировано выполнением регулируемой крутки внешнего потока воздуха. Развитие технологии ступенчатого сжигания в горелках привело к организации ввода части горячего воздуха в топку, минуя основные каналы горелки и амбразуру горелки, через отдельные сбросные шлицы с автономными подводами воздуха. Здесь совершается плавный переход от ступенчатого сжигания в горелке к ступенчатому сжиганию в топке (рис. 9.22).

Известны конструкции многоканальных по воздуху пылеугольных горелок, в которых помимо двух основных каналов горячего воздуха и центрального канала «мазутного» воздуха организуется отдельный концентричный канал для ввода в топку сушильного агента (рис. 9.23).

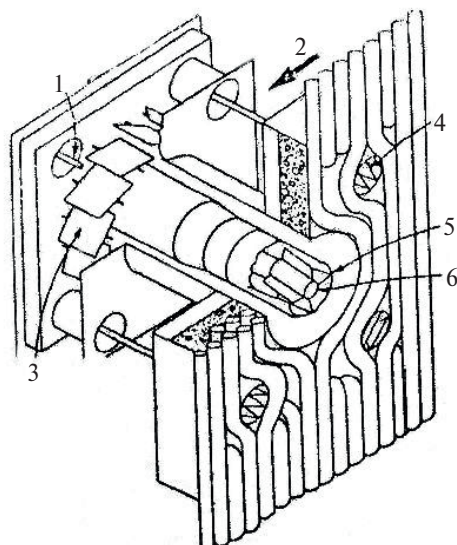


Рис. 9.22. Горелка двухступенчатого смешения с низким выходом NO:

1 — вторичный воздух; 2 — третичный воздух; 3 — направляющий аппарат для регулирования закручивания; 4 — отверстия для третичного воздуха с направляющими лопатками; 5 — форсунка; 6 — распылитель угля

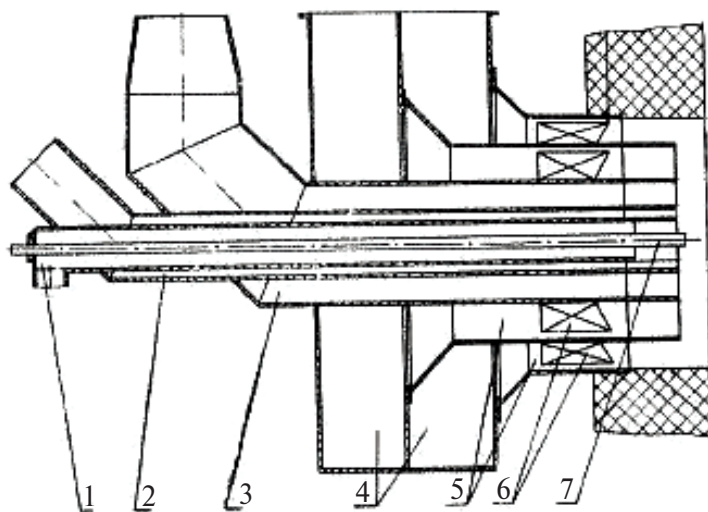


Рис. 9.23. Пылеугольная двухканальная горелка с дополнительным (третьим) каналом для сушильного агента:

1 — канал центрального («мазутного») воздуха; 2 — канал сушильного агента;  
3 — канал аэросмеси; 4 — общий секционированный короб вторичного воздуха; 5 — каналы вторичного воздуха; 6 — завихрители; 7 — форсунка мазутная растопочная

В конструкции горелки со ступенчатым смешением особое значение придается отклоняющей насадке на перегородке, разделяющей оба смежных потока воздуха. Это усиливает эффект ступенчатого смешения.

Организация двухступенчатого сжигания в прямоточных горизонтально-щелевых и вертикально-щелевых горелках также предусматривает конструктивные способы ограничения взаимодействия смежных потоков аэросмеси и вторичного воздуха, придания ему поэтапного, ступенчатого характера. Основным способом является установка прямоточных каналов аэросмеси под различным углом к горизонтальной плоскости — здесь речь идет не о концентричной компоновке горелок, а о конструкции угловой прямоточной горелки с различной ориентацией каналов аэросмеси и вторичного воздуха. Оси этих каналов образуют угол  $20\text{--}25^\circ$ . В методических указаниях [19] горизонтально-щелевые каналы выполняются следующим образом:

- нижние сопла вторичного воздуха направлены параллельно соплам аэросмеси ( $20\text{--}40\%$  расхода вторичного воздуха);
- остальные каналы вторичного воздуха отклонены от направления сопел аэросмеси в сторону экранов, что создает воздушную завесу, снижая опасность шлакования и коррозии экранных труб и, прежде всего, замедляя смешение с аэросмесью, ограничивая образования оксидов азота.

При такой структуре факела в начальном его участке складывается низкий избыток воздуха, что ограничивает образование оксидов азота.

### *1) Двухканальные газомазутные горелки*

Особенности конструктивных методов организации ступенчатого сжигания в газомазутных горелках отражают специфику механизма воздействия на процессы горения и образование оксидов азота. Ступенчатость достигается воздействием на воздушный режим горелки — регулируя интенсивность смешения смежных потоков горячего воздуха, либо воздействием на распределение газовых струй в потоке воздуха, последовательным, ступенчатым вводом газовых струй в поток горячего воздуха при наборе нагрузки либо таким же способом для снижения нагрузки горелки. Показанная на рис. 9.20 горелка с двумя отдельными подводами газа для двух отдельных зон раздачи газовых струй обеспечивает:

- возможность поддержания необходимого избытка воздуха в факеле при различной нагрузке горелки путем регулирования подачи газа в каждый из двух газовых коллекторов;
- возможность поддержания оптимального избытка воздуха в начальном участке факела, регулируя соотношение расходов и крутки смежных потоков горячего воздуха.

Таким образом, газовая горелка для функционирования в режиме ступенчатого сжигания должна оснащаться:

- двумя отдельными концентрическими воздушными каналами в цилиндрической горелке с различной регулируемой круткой или рядом горизонтальных щелевых либо вертикальных каналов для прямо-точной горелки;
- двухканальной системой газоснабжения с раздачей газа в различных воздушных потоках.

## *2) Двухканальные по вторичному воздуху пылеугольные вихревые горелки*

В пылеугольных горелках изначально существуют два отдельных канала подвода воздуха — канал первичного воздуха (аэросмеси) и канал горячего (вторичного) воздуха. Регулирование интенсивности смешения этих потоков (концентрических в вихревых горелках и смежных в прямо-точных горелках) является важным инструментом воздействия на выход оксидов азота и на эффективность воспламенения и выгорания топлива.

В вихревой цилиндрической пылеугольной двухканальной горелке ступенчатого сжигания выполнены три концентрических канала — приосевой канал топлива с первичным воздухом, охватывающий его канал вторичного воздуха, разделенный кольцевой перегородкой по всей длине на два изолированных кольцевых канала. Двухканальные по вторичному воздуху горелки обеспечивают механическое разделение потоков вторичного воздуха с помощью разделительных перегородок, исключающих взаимодействие указанных потоков по всей длине горелки вплоть до выхода в топку. Появление в горелке дополнительного канала вторичного воздуха формирует еще одну зону аэродинамического взаимодействия смежных воздушных потоков. Таким образом, применительно к пылеугольной двухканальной (по первичному воздуху) горелке необходимо решать две задачи по взаимодействию смежных потоков — аэросмесь — горячий воздух (внутренний поток) и между двумя

потоками горячего воздуха (внутренний и периферийный в цилиндрической горелке). При этом совмещение оптимальных условий выгорания топлива и сниженного выхода оксидов азота может быть осуществлено за счет поддержания:

- расхода внутреннего потока вторичного воздуха соответственно оптимальному (*по условиям выхода оксидов азота*) соотношению полных импульсов потока аэросмеси и внутреннего потока вторичного воздуха;
- оптимального (*по условиям выгорания пылевоздушной смеси*) соотношения скорости аэросмеси и основного (периферийного) потока вторичного воздуха, соответствующего нормативному значению скоростей этих потоков.

При этом каждый из потоков вторичного воздуха решает свои, специфические задачи: внутренний определяет условия стабилизации и начального воспламенения пылеугольного факела, подмешивание к факелу внешнего потока тормозится конструктивными и аэродинамическими методами, что способствует подавлению вредных выбросов. Оптимальное взаимодействие этих потоков позволяет успешно решать обе эти задачи разнонаправленными методами — в первом случае интенсифицируется смешение аэросмеси и внутреннего потока вторичного воздуха, для второй задачи приходится притормаживать смешение внешнего потока воздуха к факелу.

Значительный экологический эффект достигнут в цилиндрических двухканальных пылеугольных вихревых горелках конструкции «Бабкок — Вилькокс». Аксиальная двухканальная горелка имеет два концентричных смежных канала с регулируемым лопаточным аппаратом в каждом из воздушных каналов. Обеспечивается снижение выхода оксидов азота на 50–70 %. Здесь весь поток топлива развивается в начальном участке факела при недостатке воздуха ( $\alpha \approx 0,7–0,8$ ). В результате снижается максимальная температура факела (уменьшается интенсивность процессов окисления азота воздуха за счет выделения основной массы азотсодержащих веществ топлива в среде с минимальной концентрацией кислорода; осуществляется переход выделяющегося атомарного азота в молекулярный азот. Отклонение наружного потока вторичного воздуха от ядра факела усиливает эффект ступенчатого смешения и обеспечивает дополнительное снижение оксидов азота (рис. 9.24).

В другой двухканальной горелке фирмы «Бабкок — Вилькокс» (рис. 9.25) существенно наличие лопаточного завихрителя во внутреннем канале вторичного воздуха с регулируемым углом установки лопаток и наружного незакрученного потока вторичного воздуха.



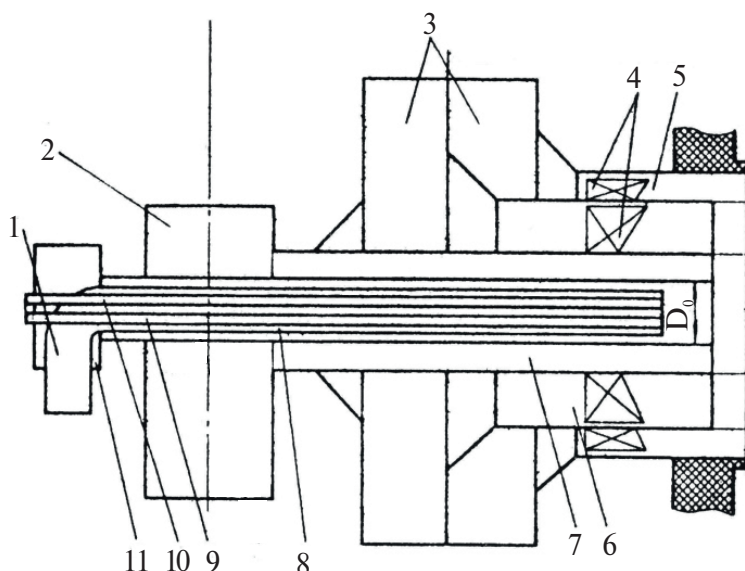


Рис. 9.24. Пылеугольная горелка с двумя каналами вторичного воздуха с разделением вторичного воздуха во входе в горелку:

1 — входной короб центрального потока газа; 2 — входной патрубок центрального воздушного канала; 3 — воздушный короб вторичного воздуха; 4 — лопаточный завихритель; 5 — пристенный холодный воздух; 6 — внешний поток вторичного воздуха; 7 — канал центрального потока воздуха; 8 — пылеподающий патрубок; 9 — аэросмесь высокой концентрации; 10 — вспомогательный канал горячего воздуха, 11 — электрозapальник

При этом внутренний поток вторичного воздуха при значительной кривке смещается к периферии, ограничивая при этом контакт его с центральной прямооточной струей аэросмеси, обеспечивая при этом интенсивную рециркуляцию горячих топочных газов к корню факела, устойчивое воспламенение смеси. Прямоточный периферийный поток вторичного воздуха ограничивает раскрытие закрученного внутреннего потока и завершает смесеобразование в зоне, в которой конверсия топливного азота в молекулярный завершена. За счет аэродинамического размежевания потоков складываются благоприятные условия для предотвращения окисления азота топлива — на горелках «Бабкок — Вилькоккс» достигнуто снижение выхода оксидов азота на 40–60 %. В различных модификациях эта конструкция получила широкое распространение и в котлах других фирм («Фостер Уиллер», «Дойче Бабкок», «Бабкок — Хитахи»).



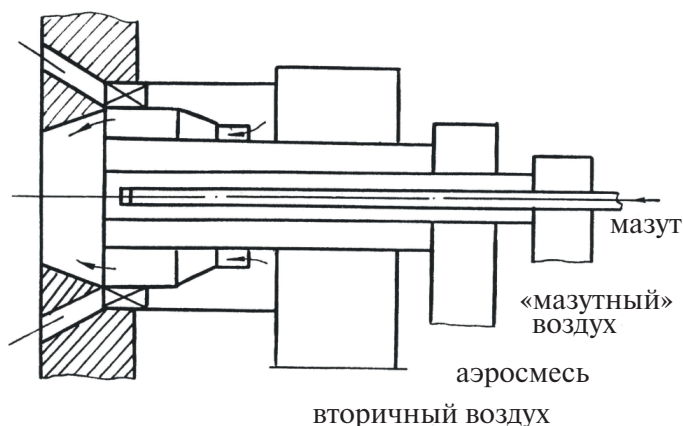


Рис. 9.25. Пылеугольная горелка с разделением вторичного воздуха на два изолированных потока непосредственно в полости горелки

В конструкции горелки со ступенчатым смешением особое значение придается отклоняющему коническому насадку на кольцевой перегородке, разделяющей канал вторичного воздуха на два изолированных канала. Отклонение наружного потока вторичного воздуха от ядра факела усиливает эффект ступенчатого смешения и обеспечивает дополнительное снижение оксидов азота. Указанная конструкция рассчитана на 50 %-ное снижение выбросов оксидов азота. Дополнительные конструктивные элементы, улучшающие условия воспламенения, стабилизирующие факел, — конический диффузор для эффективного распределения угольной пыли, стабилизирующее кольцо на выходе из канала аэрозоли. Здесь обеспечивается снижение выхода оксидов азота на 50–70 %.

Модернизация горелки включала установку в канал вторичного воздуха трубы, разделяющей канал на два равных по проходным сечениям кольцевых канала и имеющей на выходе конический диффузор. Это устройство способствует пространственному разделению в топочном объеме периферийного потока вторичного воздуха и остальной топливовоздушной смеси.

Существенным фактором при создании двухканальной пылеугольной горелки является способ размежевания двух смежных потоков вторичного воздуха. В типовых вихревых пылеугольных горелках наиболее распространенным решением является разделение канала вторичного воздуха на два канала кольцевой тонкостенной перегородкой по всей длине горелки. Такой конструктивный прием уже сам по себе замедляет смесеобразование и способствует снижению выброса ок-

сидов азота. Однако этого недостаточно для получения необходимого экологического эффекта.

Известен опыт проведения модернизации вихревых горелок на котле ПК-39 с преобразованием их в двухканальные по вторичному воздуху (Ермаковская ГРЭС, экибастузский уголь) [25]. Топка этого котла оборудована прямоточно-вихревыми горелками с регулируемой круткой вторичного воздуха, аэросмесь поступает по прямоточному кольцевому каналу. Модернизация горелки включала установку в канал вторичного воздуха трубы, разделяющей канал на два равных по проходным сечениям кольцевых канала и имеющей на выходе конический диффузор. После реконструкции топка котла была оборудована вихревыми горелками с регулируемой круткой вторичного воздуха, аэросмесь поступала по прямоточному кольцевому каналу. Это устройство способствует пространственному разделению в топочном объеме периферийного потока вторичного воздуха и остальной топливовоздушной смеси, отклоняя периферийный поток к экранным поверхностям. Замедленное смесеобразование приводит к уменьшению выхода оксидов азота при  $\alpha = 1,2$  на 23 %.

При оценке столь скромного итога реконструкции обращают внимание два обстоятельства:

- в горелке организуются два смежных равновеликих по мощности закрученных потока вторичного воздуха, которые могут развиваться в топке как монолитная аэродинамическая структура;
- использованы дополнительные конструктивные способы раскрытия закрученных кольцевых струй вторичного воздуха по выходу их в топку (конический диффузор).

Проведенные исследования и практический опыт показывают возможность ослабления взаимодействия концентричных потоков в случае их различия по углу крутки, массе и скорости истечения из горелки:

- соотношение расходов внутреннего и внешнего (периферийного) потоков вторичного воздуха составляет в среднем до 0,6; это создает условия для меньшего взаимодействия обоих концентричных потоков вторичного воздуха;
- скорость внутреннего потока воздуха, контактирующего с аэросмесью; поддерживается меньшей относительно внешнего потока, при этом замедляется подмешивание вторичного воздуха к аэросмеси, предотвращается сепарация угольных частиц из факела, повышается влияние внешнего потока на формирование приосевой зоны обратных токов и внутреннего воспламенения;

– в ряде конструкции (в частности, в горелках Бабкок-Вилкокс) внешний поток имеет меньшую закрутку, чем внутренний. Это обеспечивает замедленное подмешивание его к факелу и в то же время обеспечивает на второй стадии формирования факела необходимую интенсивность смешения с аэросмесью.

#### **9.14.5. Пространственное разделение потоков в горелках**

##### **1) *Разделение потоков аэросмеси и вторичного воздуха***

В зарубежной практике для уменьшения образования оксидов азота в горизонтально-щелевых прямоточных горелках организуется определенное смещение выходных каналов аэросмеси и вторичного воздуха с образованием разрыва между потоками. Наличие такого пространственного разделения потоков аэросмеси и вторичного воздуха не препятствует начальному воспламенению аэросмеси (за счет кислорода первичного воздуха). Но оно при этом создает определенный промежуток времени для термического и химического преобразования исходного топлива и промежуточных продуктов горения, ограничивая образование  $\text{NO}_x$  и способствуя их восстановлению в факеле. Отечественные разработки [26] используют этот прием в вихревых горелках. В вихревой пылеугольной горелке между кольцевым каналом аэросмеси и периферийным коаксиально-кольцевым каналом вторичного воздуха организуется дополнительный непроточный кольцевой канал. Ширина этого канала составляет не менее 0,1 от наружного диаметра периферийного канала вторичного воздуха.

##### **2) *Пространственное разделение потоков вторичного воздуха в двухканальной вихревой горелке***

Наличие двух смежных потоков вторичного воздуха, разделенных тонкостенной перегородкой, само по себе не может дать существенного экологического эффекта. Это подтверждается экологическими характеристиками сдвоенных пылеугольных горелок котлов БКЗ–420–140–5, работающих на экибастузском угле. Такие котлы паропроизводительностью 420 т/ч с пылесистемой прямого вдувания оснащены восемью двухпоточными (сдвоенными) пылеугольными горелками. Каждая горелка представляет комбинацию двух автономных пылеугольных горелок: два концентричных канала аэросмеси, связанных с различными мельницами, два концентричных потока вторичного воздуха (наружный с поворотными лопатками и внутренний с неподвижными лопатками).

На практике концентрация  $\text{NO}_x$  в дымовых газах таких котлов составляет при номинальной нагрузке 900–1050 мг/нм<sup>3</sup>. Такой показа-

тель характерен для вихревых пылеугольных горелок с одним каналом вторичного воздуха. Это указывает на то, что при выполнении тонкостенной разделительной перегородки между равными по мощности вихревыми потоками с равной круткой последние развиваются на выходе из горелки как единый монолитный поток.

На рис. 9.26, 9.27 приведена двухпоточная пылеугольная горелка котла БКЗ-420—140—5 до и после реконструкции. Для более эффективного разделения двух коаксиальных потоков осуществлен пространственный разрыв между ними — между двумя кольцевыми каналами вторичного воздуха устанавливается кольцевая непроточная полость значительной ширины 18 (рис. 9.27), связанная с воздушным каналом системой отверстий для ввода вентилирующего воздуха [27; 28]. При такой реконструкции горелки достигнуто снижение концентрации оксидов азота в топочных газах не менее чем на 27 %, в среднем до 620—650 мг/м<sup>3</sup>.

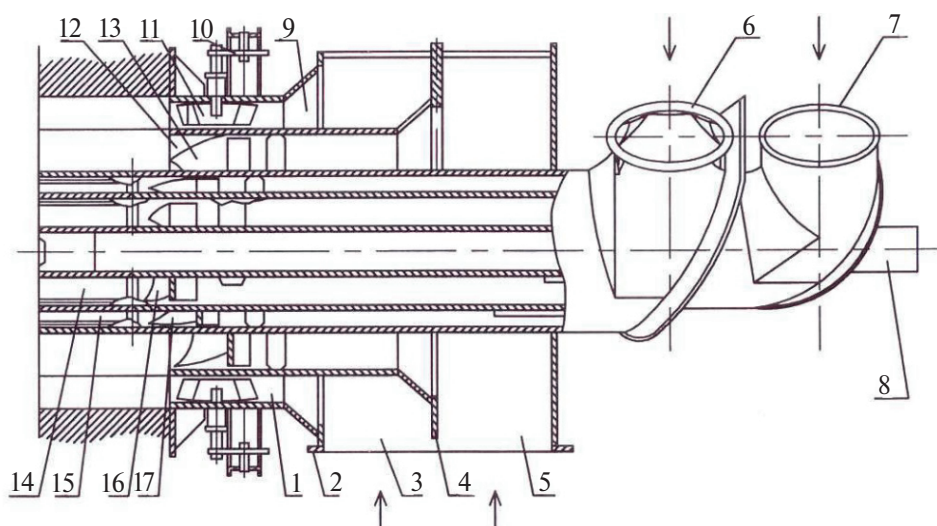


Рис. 9.26. Двухпоточная пылеугольная горелка котла БКЗ-420—140—5 до реконструкции:

1 — корпус горелки; 2 — входной патрубок вторичного воздуха; 3 — входной канал внешнего потока вторичного воздуха; 4 — разделительная перегородка входного патрубка горелки; 5 — входной канал внутреннего потока вторичного воздуха; 6 — входной патрубок внешнего потока аэросмеси; 7 — входной патрубок внутреннего потока аэросмеси; 8 — центральная труба; 9 — внешний канал вторичного воздуха; 10 — устройство регулирования поворота лопаток внешнего канала вторичного воздуха; 11 — поворотные лопатки канала вторичного воздуха; 12 — внутренний канал вторичного воздуха; 13 — лопатки внутреннего канала вторичного воздуха; 14 — внутренний канал аэросмеси; 15 — внешний канал аэросмеси; 16 — лопатки внутреннего канала аэросмеси; 17 — лопатки внешнего канала аэросмеси

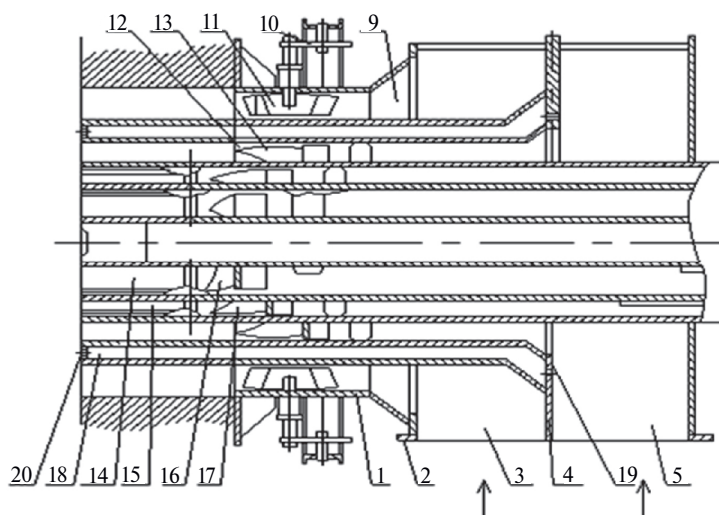


Рис. 9.27. Реконструированная двухпоточная горелка с промежуточным непроточным каналом. Обозначения 1–17 такие же, как и на рис. 9.26;

18 — непроточный кольцевой канал; 19 — дополнительная кольцевая перегородка между каналами вторичного воздуха, 20 — выход вентилирующего воздуха из непроточного канала

#### 9.14.6. Расщепление потока аэросмеси на выходе из горелки

Управляемый процесс неравномерного распределения пыли по окружности в выходном сечении канала аэросмеси позволяет формировать заданное чередование переобогащенной и обедненной смеси, при этом регулировать выход оксидов азота.

Эффективным конструктивным приемом организации дискретного ввода аэросмеси в топку является установка на выходе из канала аэросмеси распределителя в виде плохобтекаемого тела, стягивающего кольцевой (либо цилиндрический) поток аэросмеси в ряд жгутов, развивающихся в начальном участке факела вне связи друг с другом. Такое расщепление потока аэросмеси формирует локальные высококонцентрированные пылевоздушные потоки в факеле, задерживая воспламенение и смесеобразование. Это создает условия для прогрева топливных частиц, выделения летучих, включая продукты распада термонеустойчивых азотосодержащих соединений топлива, и перевода связанного азота в молекулярный азот. Кроме того, с этим связаны все другие явления, сопутствующие замедленному смесеобразованию, оказывающие тормозящее влияние на окисление азота воздуха.

Подобная конструктивная схема расщепления потока аэросмеси реализуется во многих зарубежных пылеугольных горелках, она использована также в разработке ВТИ [29]. Конструкция вихревой горелки с расщеплением потока аэросмеси представлена на рис. 9.28.

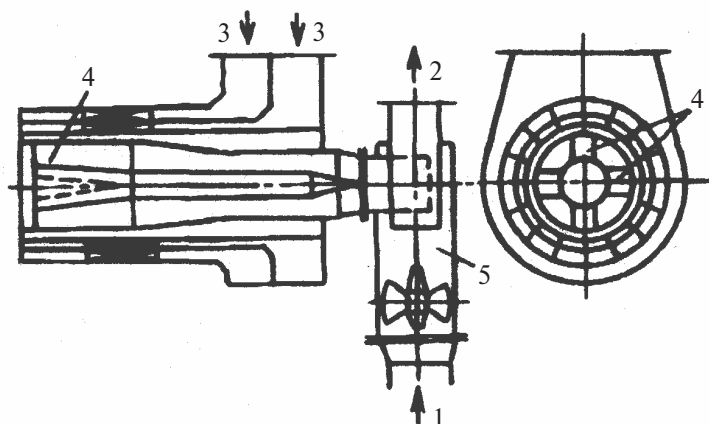


Рис. 9.28. Вихревая горелка с расщеплением потока аэросмеси:

1 — аэросмесь; 2 — слабозапыленный воздух; 3 — вторичный воздух;  
4 — расщекатель; 5 — пылеконцентратор

Закрутка вторичного воздуха в такой горелке осуществляется лопаточными завихрителями. Непосредственно перед горелкой на горизонтальном участке пылепровода установлен центробежный пылеконцентратор 5. Степень отделения пыли составляла 0,89, а степень разделения сушильного агента — 0,43. После пылеконцентратора основной поток пылевзвеси направляется в центральный канал горелки, на выходе из которого установлен расщекатель 4, разделяющий поток на четыре прямооточные струи. Между соплами пылевзвеси и внутренним каналом вторичного воздуха имеется разрыв. Сбросной воздух подается в топку через специальные сопла, размещенные на задней и боковых стенах выше горелки.

Установка новых горелок не повлияла на надежность работы котла (шлакования экранов, фестона и конвективного пароперегревателя не наблюдалось) и практически не привела к снижению экономичности сжигания.

Установка на котле паропроизводительностью 230 т/ч горелки с расщепленным каналом пылевзвеси, разрывом между соплами пылевзве-



си, каналом вторичного воздуха и предвключенным пылеконцентратором позволила снизить концентрацию оксидов азота до 400–450 кг/м<sup>3</sup> при  $\alpha = 1,2$ . Это в два раза меньше, чем при заводских двухулиточных горелках и примерно на 40 % ниже по сравнению с лопаточно-лопаточными горелками.

#### **9.14.7. Аэродинамические способы направленного воздействия на интенсивность смесеобразования**

Конструктивные методы направленного воздействия на интенсивность смесеобразования существенно дополняются аэродинамическими способами управления процессами формирования топливо-воздушной смеси. Одним из таких способов является оптимизация скоростного режима горелки путем поддержания определенного соотношения скорости смежных потоков аэросмеси и вторичного воздуха. Результаты испытаний двух пылеугольных котлов П-57 блоков 500 МВт показывают экстремальный характер зависимости выхода оксидов азота от скоростного режима работы горелок: минимальный выход  $\text{NO}_x$  соответствует соотношению полных импульсов потоков аэросмеси и вторичного воздуха, близкому к 1. Это соответствует наибольшей длине факела, наименее интенсивному выгоранию при взаимодействии спутных турбулентных потоков аэросмеси и вторичного воздуха.

Ввод аэросмеси и вторичного воздуха в прямоточных тангенциальных пылеугольных горелках под некоторым углом друг к другу создает условия для подавления оксидов азота. Смесеобразование здесь завершается на значительном удалении от среза горелки, после завершения термической обработки угольной пыли и преобразования топливных оксидов азота в молекулярный азот. Так, на котле типа ТП-85 отклонение потока аэросмеси от оси ввода вторичного воздуха на пять градусов (к центру топки) позволило снизить выход оксидов азота на 40 %.

#### **9.14.8. Управление скоростью химической реакции горения**

Наряду с рассмотренными конструктивными и режимными способами управления диффузионной составляющей процесса сжигания топлива осуществляют управление скоростью химической реакции горения. Она является кинетической составляющей процесса горения топливо-воздушной смеси и зависит от соотношения концентрации



реагирующих компонентов. Замедление скорости химической реакции на всем протяжении основного участка факела обеспечивает снижение максимальной температуры факела, рассредоточение тепловыделения по высоте топки, уменьшение локальных тепловых потоков в зоне максимального тепловыделения и снижение воздушных и топливных оксидов азота. Этот процесс реализуется на практике путем снижения концентрации окислителя в воздушном потоке балластированием его инертной средой (рециркулирующими дымовыми газами) до подачи воздуха в горелку. Следует учитывать, что при снижении концентрации кислорода в воздухе до 14 % он способен поддерживать воспламенение и горение топлива [30]. Эффективность этого технологического мероприятия зависит от степени выравнивания состава забалластированного потока воздуха.

#### **9.14.9. Использование газов рециркуляции в горелке**

Сведения по эффективному использованию газов рециркуляции в горелках достаточно противоречивы. Поэтому необходимо проанализировать имеющиеся данные.

Поступающие в горелку газы рециркуляции могут воздействовать на оксиды азота в различных направлениях:

- выполнять роль изолирующей среды, разделяющей топливо и окислитель, тормозящей смесеобразование;
- обеспечивать обеднение окислителя за счет снижения концентрации кислорода;
- снижать температурный уровень топочного процесса.

В конкретных условиях, определяемых особенностями топлива, способом ввода газов рециркуляции, роль указанных факторов будет различной.

Рециркуляция инертных газов (дымовых газов) в факел позволяет снизить выход оксидов азота, образующихся из азота воздуха (воздушные или тепловые оксиды азота), и незначительно воздействует на образование топливных оксидов. Поэтому она дает наибольший эффект при сжигании газообразного топлива и мазута при воздействии на процессы в начальном участке факела.

С учетом приведенных соображений становится понятной сравнительная оценка различных способов подачи газов рециркуляции [31], которая дается относительно базового режима — ввода газов через щели напротив нижнего яруса горелок (табл. 9.2).

Таблица 9.2

**Сравнительная оценка различных способов подачи газов рециркуляции**

Способ подачи газов рециркуляции	Коэффициент эффективности А
в смеси с газообразным топливом	4,5
в первичный воздух перед горелкой	3,0
в общий канал дутьевого воздуха	2,5
по периферийному кольцевому каналу	1,2–1,5
через шлицы напротив нижнего яруса горелок	1,0
через шлицы под горелками	0,8–1,0
через шлицы в холодной воронке	0,2

На практике широко используются все перечисленные варианты. По каждому из них за последнее время достигнуто повышение эффективности рециркуляции газов.

Наибольшая эффективность — снижение выхода оксидов азота на один-два порядка достигнута при максимальной однородности заранее подготовленной смеси воздуха и газов рециркуляции.

На котле ТГМ-96 ТЭЦ-8 Мосэнерго подача в горелки дымовых газов в смеси с дутьевым воздухом (подача газа на всас дутьевого вентилятора) позволила снизить выход  $\text{NO}_x$  до 65 %.

Ввод дымовых газов в общие короба вторичного воздуха котла БКЗ-420–140 ГМН Энгельской ТЭЦ дает столь же значительный эффект — концентрация  $\text{NO}_x$  составляет 100 мг/м<sup>3</sup> (кратность рециркуляции составляет в среднем 15 %).

Применение рециркуляции связано со снижением КПД котла в среднем на 0,03–0,06 % на каждый процент кратности рециркуляции за счет увеличения потерь с уходящими газами и увеличения затрат энергии на собственные нужды.

При использовании мазута оказалась весьма эффективной конструкция трехканальной газомазутной горелки с промежуточным вводом газов рециркуляции за счет перераспределения газозоудных потоков по каналам горелки. При поддержании высоких скоростей потоков у корневой части факела обеспечивается снижение максимальной температуры, локальных тепловых потоков в зоне максимального тепловыделения при снижении выбросов оксидов азота на 40 %.

Сопоставление двухканальных горелок котла ПК-38 при работе на мазуте с периферийным и промежуточным (в рассечку между ка-

налами первичного и вторичного воздуха) вводом газов рециркуляции выполнено в работе [32]. Установлено, что более значительно подавление выхода оксидов азота при промежуточной рециркуляции с долей первичного воздуха до 0,35–0,4 от общего расхода.

Имеется определенный опыт использования рециркуляции и в пылеугольных котлах. Газы рециркуляции на таких котлах вводятся через горелки, разделяя потоки аэросмеси и вторичного воздуха.

#### **9.14.10. Процессы восстановления $\text{NO}_x$ в факеле (режим трехступенчатого сжигания)**

При организации ступенчатого сжигания в пределах факела проявляются механизмы, соответствующие режиму трехступенчатого сжигания, — восстановление уже образовавшихся оксидов азота продуктами неполного горения (стабильными и короткоживущими). Такие процессы непосредственно в факеле складываются при поступлении части топлива в бескислородную зону факела. Это достигается, например, при прямой подаче топлива и интенсивной крутке периферийного потока вторичного воздуха, подаче промежуточного потока топлива между расходящимися кольцевыми вихревыми потоками воздуха. В результате формируется восстановительная зона, насыщенная высокоактивными промежуточными продуктами неполного горения, обрывками реакционных цепей, выполняющих функции восстановителей  $\text{NO}_x$  до молекулярного азота  $\text{N}_2$ . При смешении приосевого потока топлива с охватывающим потоком вторичного воздуха формируется топливовоздушная смесь практически стехиометрического состава (избыток воздуха — около  $\alpha = 1,0$ ).

Эти процессы можно активизировать конструктивными способами. Так, в горелке по патенту РФ № 2038535 [26] конструкция топливо-выдающего устройства позволяет направить по центральному каналу в зону, обедненную окислителем, до 15–35 % топлива. Попадая в высокотемпературную и обедненную кислородом приосевую зону факела, частицы топлива быстро газифицируются, образуя продукты сгорания с радикалами типа  $\text{C}_n\text{H}_m$ , которые при смешении с оксидов азота дымовых газов от сгорания основной массы топлива разлагают  $\text{NO}_x$  до  $\text{NH}_3$ , и далее до молекулярного азота. Необходимым условием такой работы горелки является организация воспламенения и выделения радикалов разложения в центральном потоке топлива на удалении от устья горелки за фронтом воспламенения и образования  $\text{NO}_x$  в основном потоке топлива.

Периферийный поток воздуха обеспечивает дожигание продуктов неполного горения из восстановительной зоны по мере смешения с ними.

#### **9.14.11. Комбинация конструктивных мероприятий для создания малотоксичных горелок**

Примером использования комплекса природоохранных мероприятий является проведенная реконструкция горелок на котле ТГ-104 [24]. Здесь двенадцать вихревых двухканальных горелок конструкции ТКЗ, размещенных в два яруса на фронтальном экране, были заменены малотоксичными прямоточно-вихревыми горелками. В исходной конструкции горелок заводского исполнения уровень концентрации оксидов азота достигал  $700 \text{ мг/м}^3$  и выше. Переход от горелочных устройств с чисто вихревой аэродинамикой к прямоточно-вихревой позволил снизить концентрацию  $\text{NO}_x$  в 2–2,5 раза. Одновременно с установкой таких «малотоксичных» горелок был реализован комплекс технологических мероприятий — ступенчатое сжигание, рециркуляция дымовых газов.

Суммарный экологический эффект достигается при оптимальной загрузке ДРГ и перебросе части топлива с верхнего яруса горелок на нижний (12 %).

Созданные на этой основе конструкции горелок показали сниженный выход оксидов азота на природном газе. Оптимальное значение рециркуляции дымовых газов составило 16 %. Концентрация  $\text{NO}_x$  в этих условиях составляла 60–100  $\text{мг/м}^3$ . С отключением схемы рециркуляции дымовых газов отмечен рост концентрации оксидов азота в уходящих газах при номинальной нагрузке котлов до 220  $\text{мг/м}^3$  (при нормативной величине для новых котлов 125  $\text{мг/м}^3$  по ГОСТ Р 50831–95). Дальнейшее сокращение выброса  $\text{NO}_x$  в сложившихся условиях было возможно только за счет увеличения доли рециркуляции дымовых газов до уровня 16–18 %, что предопределяло необходимость включения в работу аварийного впрыска для корректировки температуры пара промежуточного перегрева.

#### **9.15. Горелки с регулируемым положением факела в топочной камере**

---

Положение факела в топочной камере во многом определяет эффективность топочного процесса — распределение тепловосприятия

поверхностей нагрева по высоте топки; температуру газов на выходе из топки. Регулирование положения факела в топке при работе котла достигается не только воздействием на топочные процессы (рециркуляция дымовых газов, отключение части горелок при многоярусной их компоновке, изменение направления крутки в смежных горелках, избыток воздуха), но также индивидуальным регулированием каждой горелки в отдельности, непосредственным управлением положением факела (используя конструктивные возможности горелочных устройств).

Наряду с этой задачей воздействием на конструктивные и аэродинамические параметры горелки формируются оптимальные характеристики других процессов — условия выгорания, подавления вредных выбросов оксидов азота, отличающиеся от тех, которые соответствуют условиям поддержания расчетных параметров пара, обеспечения надежности отдельных элементов топки. Так, в пылеугольной горелке наилучшие условия выгорания топливо-воздушной смеси, поддержания параметров пара, подавления топливных оксидов азота могут складываться при различном соотношении скорости вторичного воздуха и аэросмеси. Задача состоит в ранжировании по значимости последствий изменения характеристик конструкции и режима работы горелки, понимая, что в конкретных условиях приоритеты могут существенно изменяться, и в первую очередь должны рассматриваться вопросы надежности и безопасности.

### *1) Развитие способов регулирования положения факела вихревых горелок*

В вихревых горелках протяженность индивидуального факела и, соответственно, зоны горения в топке регулируется различными способами:

- изменением *интенсивности крутки воздушных потоков*, которая оценивается конструктивным параметром крутки  $n$ ;
- изменением *соотношения скорости потоков* — вихревых концентричных и прямоточных смежных;
- изменением *избытка воздуха в факеле*.

В настоящее время разрабатываются принципиально новые способы регулирования параметров вихревого факела — струйный вдув воздуха в пристенные слои потока горячего воздуха.

## *2) Регулирование крутки потока на выходе из горелки с помощью периферийного струйного радиального вдува*

В Уральском политехническом институте (сегодня Уральский федеральный университет) разработан и реализован на практике новый способ управления закрученным воздушным потоком на выходе из горелки с помощью периферийного радиального струйного вдува через перфорированную стенку выходного канала горелки [33]. Диапазон влияния этой системы на структуру закрученного потока превосходит возможности всех известных регулируемых лопаточных завихрителей.

Радиальный ввод струй воздуха осуществляется через отверстия в кольцевой периферийной стенке канала вторичного воздуха. Диаметр отверстий — 4 мм, количество — несколько тысяч. Определяющим параметром системы вдува является безразмерная скорость вдува — отношение скорости воздуха в отверстиях перфорации к расчетной скорости воздуха на выходе из горелки. Изменение структуры закрученного потока вторичного воздуха под воздействием системы периферийных струй воздуха связано со стеснением закрученного потока воздуха нарастающим по ходу потока пристенным слоем воздуха из отверстий перфорированной стенки. Это изменение структуры выражается в следующем:

- смещение максимальной радиальной и вращательной скорости потока к оси вращения;
- резкое нарастание значения радиальной скорости;
- сужение зоны обратных токов.

В результате достигаются следующие эффекты:

- снижение интенсивности крутки потока воздуха;
- снижение аэродинамического сопротивления;
- снижение выхода оксидов азота.

Этот метод обеспечивает возможность регулирования перегрева пара при различных режимах работы котла, не нарушая условия стабильности факела и при ограниченном изменении параметров зоны обратных токов.

При использовании несимметричного сектора вдува радиальных струй отмечена возможность изменения направления оси закрученного потока на выходе из горелки с отклонением в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Однако исследования этого эффекта не получили развития.

### 3) Использование плоскофакельных горелок для регулирования положения факела в топке

Основная цель, которую преследовали разработчики плоскофакельных горелок (ПФГ) — группа сотрудников ЦКТИ и Таганрогского котельного завода «Красный котельщик» [9], — сводилась к возможности изменения положения факела по высоте топки для сохранения параметров работы котла при сжигании топлив с различными характеристиками. Конструкция горелки показана на рис. 9.29.

Изменение соотношения расхода вторичного воздуха по верхнему и нижнему соплам горелки обеспечивает изменение положения плоскости слияния и растекания обоих потоков. Соответственно регулируется положение ядра факела по высоте топки. При изменении положения факела от опущенного до поднятого положение максимальной температуры факела смещается на 3 м (рис. 9.30).

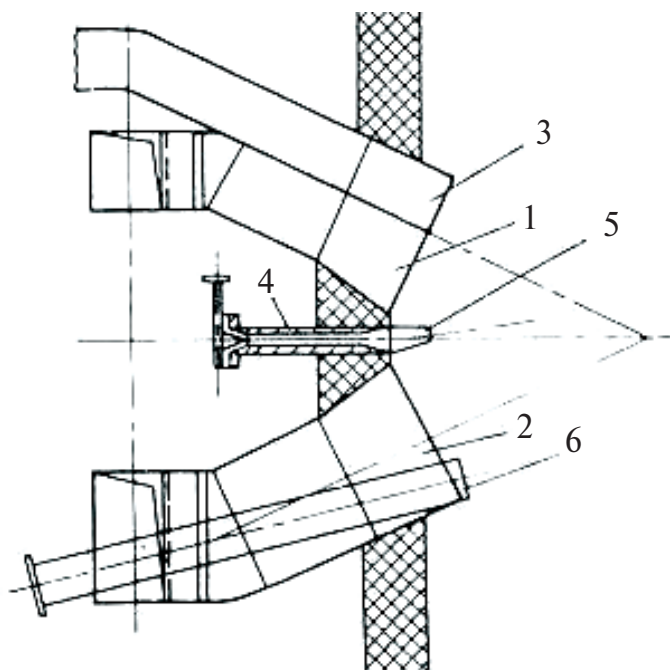


Рис. 9.29. Плоскофакельная горелка с ПВК<sub>р</sub> котла ТП-240:

- 1 — верхнее сопло вторичного воздуха, 2 — нижнее сопло вторичного воздуха;
- 3 — сопло сбросного воздуха; 4 — паровой эжектор; 5 — сопло эжектора,
- 6 — канал для мазутной форсунки



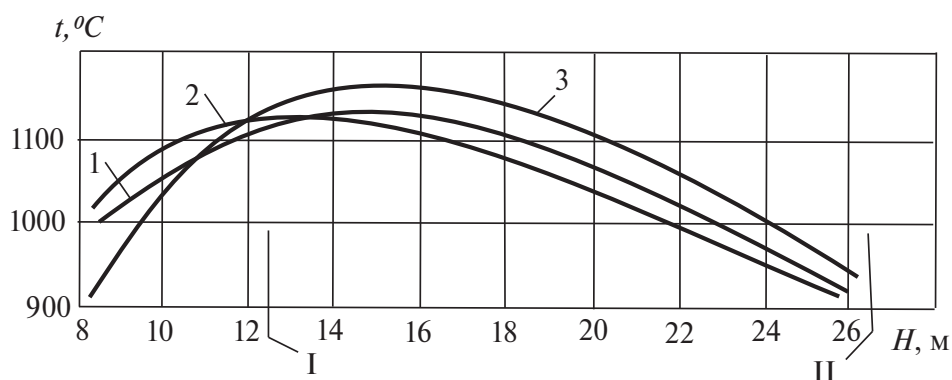


Рис. 9.30. Температура факела по высоте топки котла БКЗ-210–140 Ф с плоскофакельными горелками:

1 — факел горизонтальный; 2 — факел опущен; 3 — факел поднят;  
I — ось горелок; II — середина выходного окна

#### 4) Поворотные горелки

В немногих котлах, эксплуатируемых в России, используются поворотные горелки [7]. Они служат для поддержания оптимального положения факела при изменении нагрузки котла с целью обеспечения расчетных параметров пара (рис. 9.31).

В отличие от плоскофакельных горелок, где оперативное изменение положения факела достигается аэродинамическими методами, в поворотных горелках использованы механические способы воздействия — изменение угла наклона струи поворотом выходного участка горелки.

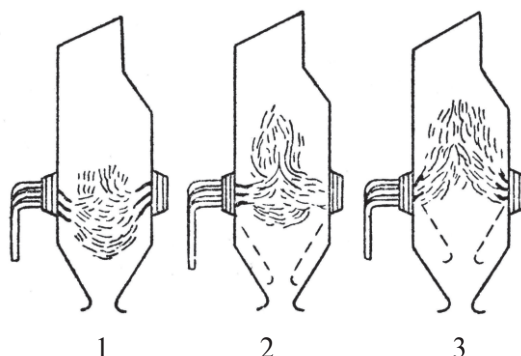


Рис. 9.31. Схема изменения положения факела в топке поворотными горелками при полной (1) и частичных (2, 3) нагрузках

Горелка типа УП-8, разработанная ЗиО для котла ПК-23 производительностью 250 т/ч, работающего на каменном угле, содержит поворотные чугунные сопла аэросмеси и вторичного воздуха (рис. 9.32). Для изменения положения факела по высоте при наладке топочного режима сопло может поворачиваться от горизонтальной плоскости вверх на  $12^\circ$  и вниз на  $20^\circ$ .

Такой способ регулирования на этом котле не получил распространения из-за значительного увеличения механического недожога топлива и повышения температуры уходящих газов. Поворотные горелки котла ПК-23 используются сейчас лишь для первичной наладки положения факела в топке.

Другие производители тоже используют поворотные горелки. Так, в топочном устройстве ALSTOM для котла на сверхкритические параметры применены тангенциальные поворотные горелки. Они оснащены специальным механизмом поворота горелок для регулирования температуры промежуточного перегрева пара.

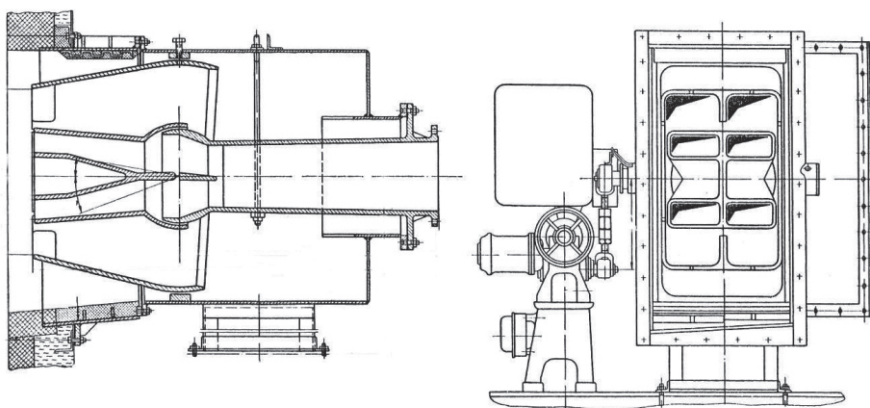


Рис. 9.32. Поворотная горелка типа УП-8

## 9.16. Растопочные горелки

В работающем пылеугольном котле воспламенение аэросмеси, поступающей из горелок, происходит за счет теплоты, получаемой от факела. В котле, пускаемом вновь или после временной остановки, для доведения аэросмеси до температуры воспламенения

необходим сторонний источник тепла. В мировой и отечественной теплоэнергетике при растопке пылеугольных котлов и для стабилизации горения, подсветки пылеугольного факела используют природный газ или топочный мазут. В условиях отсутствия природного газа и ограничения по мазуту осуществляется растопка с помощью основного топлива, специально подготовленного с помощью специальных растопочных устройств.

### *1) Муфельные растопочные устройства*

С простейших муфельных растопочных устройств начиналась в энергетике эпоха камерных топок. Они представляли собой выносные кирпичные печи, которые топились дровами. Дымовые газы этих костров обогревали топку котла до уровня, при котором обеспечивалось воспламенение топлива. Затем появились более совершенные муфельные растопочные горелки.

Муфельная горелка, изображенная на рис. 9.33 [34], имеет колосниковую решетку для сжигания кускового топлива. Над слоем выполнено сопло для ввода пылевоздушной смеси. На одной из боковых стенок — дверца для загрузки кускового топлива, с фронта — сопло для подвода пыли, под решеткой — подвод воздуха. Растопка муфеля производится обычно древесными отходами, загружаемыми через дверцу. После того как муфель раскалится, в него подается аэросмесь. Часть более крупной пыли выпадает на решетку, на горящий слой топлива и поддерживает горение в слое. Мелкие фракции пыли воспламеняются и поступают непосредственно в топку. Таким образом, пылевой факел используется вместо мазута. Муфельная горелка устанавливается под основными горелками. Муфели работают хорошо на топливах с выходом летучих более 20 %. Производительность муфельных горелок должна обеспечивать 20–25 % номинальной производительности котла.

Любопытна компоновка растопочного устройства в виде слоевой топки с колосниковой решеткой, вмонтированной в сепарационную шахту шахтно-мельничной топки. Высокотемпературные продукты горения и газификации из слоя поступают в нижний канал с аэросмесью (рис. 9.34). Первоначально осуществляется зажигание нижней части потока аэросмеси, что позволяет ограничить мощность растопочного устройства. Затем воспламенившийся нижний поток аэросмеси осуществляет воспламенение остальной части топлива.

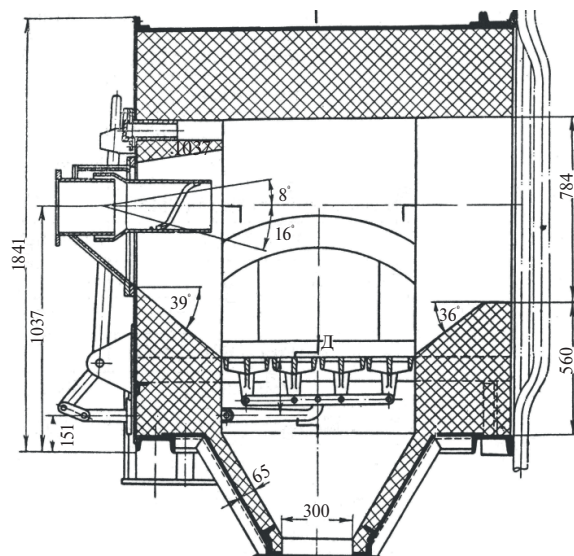


Рис. 9.33. Одна из первых типовых конструкций муфельной растопочной горелки для крупных паровых пылеугольных котлов

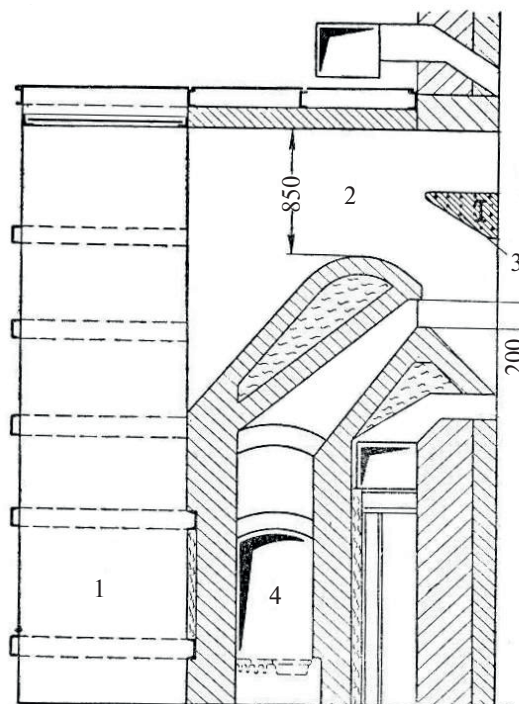


Рис. 9.34. Шахтно-мельничная амбразура топки котла со встроенным растопочным устройством:

1 — сепарационная шахта; 2 — амбразура; 3 — рассекатель; 4 — растопочное устройство

После продолжительного периода утраты интереса к муфельным устройствам, когда они были вытеснены мазутными форсунками, растопочные муфельные устройства стали востребованными вновь, когда сложился дефицит мазута. В дальнейшем при разработке различных технологий безмазутной растопки муфельные устройства выступали в различном качестве:

- как теплоаккумулятор для накопления тепла в керамической кладке от топлива, сжигаемого в слое, и последующего воспламенения струи пускового топлива в виде угольной пыли непосредственно в муфеле;
- как растопочный слоевой газогенератор, в котором газифицируется в слое твердое топливо, а генераторный газ через амбразуру вводится в топку и воспламеняет поток аэросмеси, пересекая его;
- как генератор высокотемпературной струи продуктов сгорания пускового топлива, зажигаемой от электрического разряда или плазмотрона, осуществляющих термообработку и активацию большей части пускового топлива, которая воспламеняется непосредственно в топке при контакте с воздушным потоком и осуществляет воспламенение топливо-воздушной смеси от рабочей горелки.

Известны конструкции муфельных горелок, используемых для снижения минимальной устойчивой нагрузки пылеугольных котлов [35].

Рассмотрим некоторые известные конструкции современных муфельных растопочных устройств.

## *2) Подготовка воспламеняющей среды с помощью стороннего источника тепла*

В конструкции муфельного запального устройства, разработанного в Красноярске [36], воспламеняющей средой служит весь поток воздуха с полным расчетным расходом угольной пыли (рис. 9.35). В муфеле на входе устанавливается электроподогреватель. После нагрева подаваемого первичного воздуха до температуры надежного воспламенения пыли осуществляется подача угольной пыли. Небольшая часть топлива сгорает в пределах муфеля, а остальная после смешения со вторичным воздухом (поступающим в топку через кольцевой канал, охватывающий корпус муфеля) сгорает в топке. Со временем в полости муфеля устанавливается стабильный тепловой режим, электроподогрев воздуха прекращается при сохранении процесса горения факела растопочной горелки. Такая система оказалась эффективной при использовании высокореакционного канско-ачинского угля с большим выходом летучих.

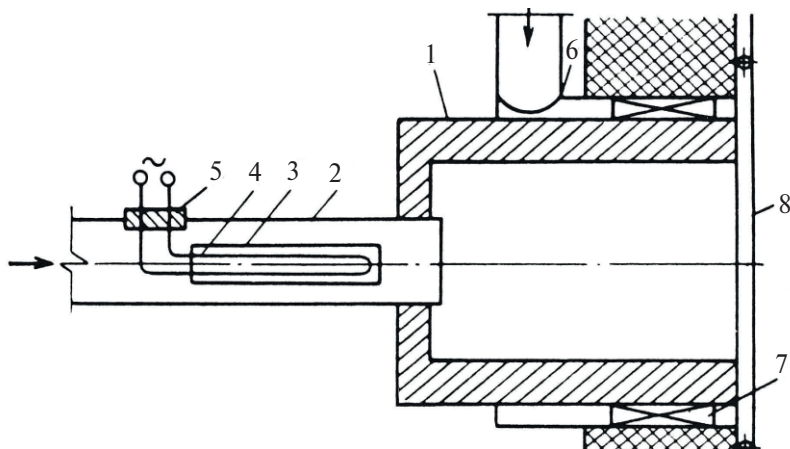


Рис. 9.35. Схема растопочной горелки с электроподогревателем:

- 1 — керамический корпус; 2 — подводящий пылепровод; 3 — делитель потока;  
4 — электрический нагреватель; 5 — изоляционная плита; 6 — короб вторичного  
воздуха; 7 — завихритель; 8 — топочная камера

### 3) Плазменные технологии в растопочных устройствах пылеугольных котлов

Отличие таких растопочных устройств от представленных выше состоит только в характере источника стороннего тепла — здесь им служит плазмотрон. Плазменно-топливная система растопочного устройства реализует три этапа процесса воспламенения:

- формирование электродугового плазменного разряда;
- термохимическая обработка части угольной пыли с получением двухфазного высокореакционного потока;
- воспламенение относительно холодного основного потока аэросмеси.

В этих растопочных устройствах последовательно усовершенствовались конструкция плазмотронов:

- первыми использовались плазмотроны с подаваемым стержневым графитовым катодом и кольцевым медным водоохлаждаемым анодом;
- затем появились плазмотроны со сменными водоохлаждаемыми катодом и анодом;
- в третьем поколении, в отличие от предыдущих конструкций, плазмотрон выполняется без использования высокого напряжения. Воздействие на часть потока аэросмеси осуществляется нагревом ее электродуговой плазмой. Термообработанное топливо в потоке аэ-



росмеси приобретает высокую реакционную способность и является непосредственным источником воспламенения. При контакте на выходе из горелки со вторичным воздухом оно воспламеняется и поджигает основной поток аэросмеси. При этом уменьшается не только напряжение, но также и потребляемая энергия, поскольку объектом воздействия электродугового плазмотрона является небольшая часть топливоздушнй смеси, поступающей в горелку.

Примеры компоновок горелок приведены на рис. 9.36, 9.37.

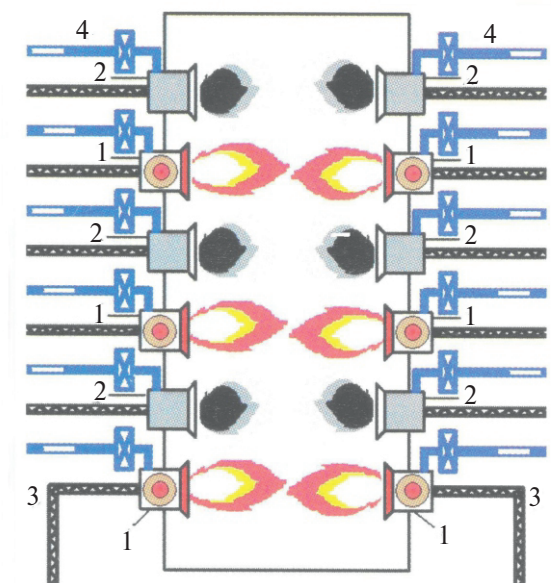


Рис. 9.36. Компоновка плазменно-топливной системы воспламенения в топке двухкорпусного котла ПК-39 (экибастузский уголь):

1 — вихревая система плазменно-топливного воспламенения; 2 — основная пылеугольная горелка; 3 — канал аэросмеси; 4 — вторичный воздух

Подобные плазменно-топливные системы [37] могут эксплуатироваться на пылеугольных котлах производительностью от 75 до 670 т/ч с различными системами пылеприготовления (прямого вдувания и с промежуточным бункером пыли).

Технические характеристики плазмотронов плазменно-топливной системы:

мощность плазмотрона, кВт	50–350
напряжение, В	250–400



ток дуги, А	200–900
масса плазмотрона, кг	25–35
масса источников питания, кг	450
ресурс электродов плазмотрона, ч	
катод/анод	250/500
температура плазменного факела, °С	3000–6000

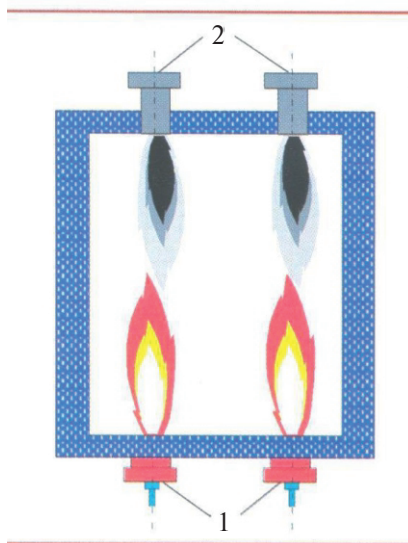


Рис. 9.37. Размещение плазменно-топливной системы воспламенения в топке котла БКЗ-75:

- 1 — вихревая система плазменно-топливного воспламенения;  
2 — основная пылеугольная горелка

#### 4) Газификация пылевидного топлива в муфельной горелке

На кафедре тепловых электрических станций Уральского федерального университета разработана высокоэкономичная растопочная газификационная горелка (рис. 9.38) [38]. Муфель представляет собой стальной короб 1, футерованный внутри шамотным кирпичом 2. Газификация ведется путем ускоренного интенсивного прогрева пылеугольной струи с последующим сжиганием топливной смеси на выходе из горелки. Прогрев ведется малорасходным (до 50 кг/ч) мазутным факелом. Далее пылевоздушный поток газифицируется и входит в автотермический режим. Мазутные факелы отключаются. Стенки муфеля, разогретые до температуры 600 °С, обладают значи-

тельным запасом тепловой энергии и при кратковременном погасании факела (либо значительном ухудшении в составе угля и, следовательно, газа) стабилизируют режим, обеспечивая последующее воспламенение.

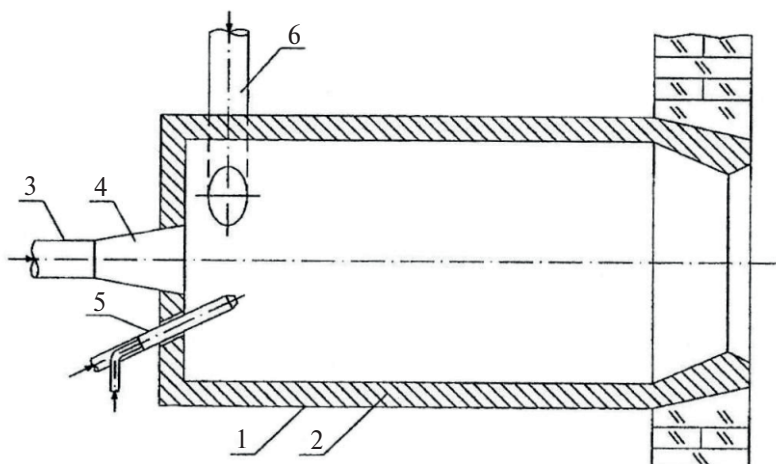


Рис. 9.38. Схема растопочной муфельной горелки с мазутоподогревателем футеровки муфеля:

1 — короб; 2 — футеровка; 3 — подача аэросмеси; 4 — диффузор; 5 — мазутная форсунка; 6 — подвод вторичного воздуха

Аналогичная конструкция разработана и в Сибирском федеральном университете [39]. При сжигании небольшого количества жидкого топлива прогревается футеровка муфеля до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После этого подается угольная пыль в потоке высокой концентрации, отключается мазут, газифицированная или прошедшая пиролиз угольная пыль воспламеняется в топке при контакте с воздухом и осуществляет растопку котла.

Следует напомнить, что технология растопки с помощью газогенерации использовалась в энергетике еще в 40–50-х гг. прошлого столетия. Растопочный генератор слоевой конструкции (рис. 9.39) [40] загружается топливом в расчете на 30–40 мин работы. Предварительно он разогревается до температуры  $1000\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  сжиганием дров или качественного угля. Высота слоя угля составляет до 1 м. Процесс газификации идет под некоторым избыточным давлением. Горячий генераторный газ поступает в топку котла.

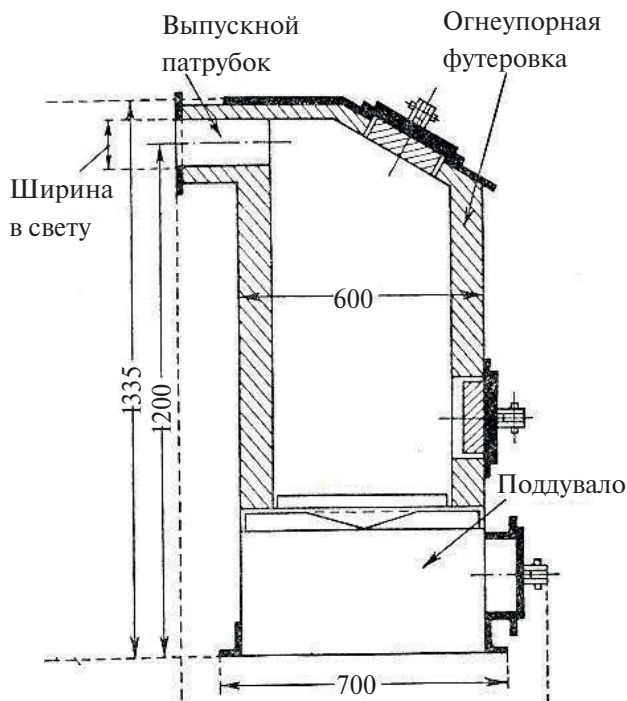


Рис. 9.39. Муфельная растопочная горелка

Обобщая известные современные разработки муфельных растопочных устройств для пылеугольных котлов, можно выделить и оценить используемые в них характерные технические решения:

- разделение потока пускового топлива на первичный, подвергающийся прямому воздействию стороннего теплового источника, и основной, который при смешении с первичным потоком проходит термическую обработку, приобретая к выходу из муфеля высокую воспламеняющую способность;
- воспламеняющая способность пускового факела не зависит от способа первичного подогрева аэросмеси — электронагревателем, дуговым, искровым разрядником, воздушной плазмой;
- использование предварительного нагрева керамической футеровки муфеля с помощью мазутного факела как стороннего источника тепла для подготовки пускового топлива значительно замедляет процесс растопки котла;

- использование высококонцентрированной аэросмеси угольной пыли тонкого помола в растопочном устройстве способствует компактности и эффективности муфельного устройства;
- термообработка аэросмеси в растопочном устройстве не предполагает газификацию угольной пыли с подачей в топку генерированного газа, задача ограничивается активацией угольных частиц в процесс пиролиза.

В итоге можно наблюдать, с одной стороны, обилие различных конструкций муфельных растопочных устройств, многочисленные патенты, публикации, научные исследования, а с другой — единичные случаи практического использования современных растопочных безмазутных устройств в отечественной энергетике. Причиной тому не только инерционность мышления руководителей электростанций, но также и невысокая надежность, энергоемкость предлагаемых решений.

В принципиально новой эффективной конструкции плазменно-угольной надподовой горелки часть основного потока угольной пыли сжигается в предвключенном устройстве под воздействием плазмотрона [41]. В котле, оснащенном такой горелкой, плазма не воздействует на свойства шлакового расплава. Электрическая мощность плазмотрона — 70 кВт, расход угольной пыли на горелку — 3,7 т/ч. Горелки этого типа установлены на котле Гусиноозерской ГРЭС (холбольджинский уголь) на уровне выше 0,3 м пода топки. Достигнуто повышение температуры над слоем шлакового расплава на 50 °С.

---

### 9.17. Надежность горелок

---

Среди конструктивных элементов горелок, наиболее подверженных разрушению и износу, следует выделить:

- центральный выходной конус вихревой горелки (способствующий повышению эффективности воспламенения и выгорания угольной пыли, защищающий от перегрева лопатки осевого завихрителя) подвергается обгоранию. Срок службы — 1,5–2 года (котел П-57);
- входной патрубок канала аэросмеси, подвержен интенсивному эрозионному износу, в результате чего возникает наружное пыление, вынужденные отключения подачи пыли к горелкам.

### 1) Защита конуса горелки от обгорания.

В ходе эксплуатации котла П-57 на экибастузском угле возникла необходимость предотвратить интенсивное обгорание конуса центральной трубы горелки. На рис. 9.40 показана пылеугольная горелка котла П-57. На рис. 9.41 приведены промежуточные конструктивные решения по увеличению надежности конуса горелки котла типа П-57.

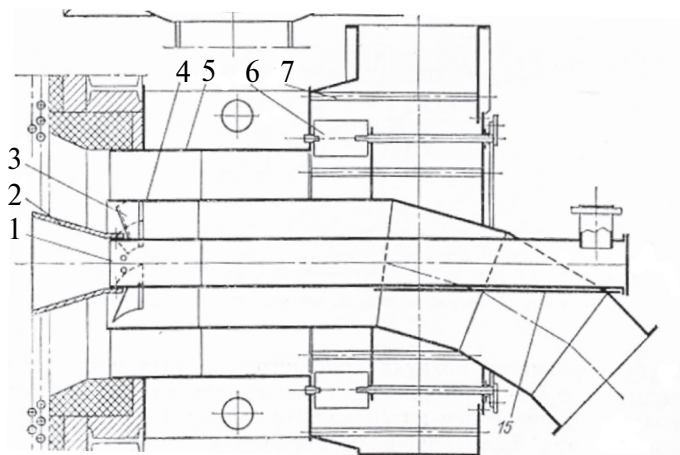


Рис. 9.40. Пылеугольная горелка котла П-57:

- 1 — центральная труба; 2 — конус центральной трубы; 3 — осевой лопаточный аппарат; 4 — труба первичного воздуха;  
5 — короб вторичного воздуха; 6 — тангенциальный лопаточный завихритель;  
7 — дистанционирующие трубы

### 2) Экранирование конуса центральной трубы горелки.

Ни одно из рассмотренных конструктивных решений по экранированию конуса центральной трубы горелки не дало удовлетворительного результата. Причина заключается в специфических свойствах использованных материалов, низкой эффективности системы охлаждения конуса. Для данных условий работы конуса целесообразно использовать систему струйного охлаждения дополнительно устанавливаемого перфорированного тонкостенного экрана с принудительным подводом охлаждающего воздуха в специально организованную закрытую полость между экраном и конусом (рис. 9.42). Известно, что при стоке струй охлаждающего воздуха через дырчатую тонкостенную пластину теплоотвод значительно эффективнее поверхностного продольного ее охлаждения сплошным потоком воздуха при том же суммарном расходе охлаждаю-

шей среды. Поэтому такая защита конуса горелки, необходимого по условиям организации горения, представляется наиболее эффективной.

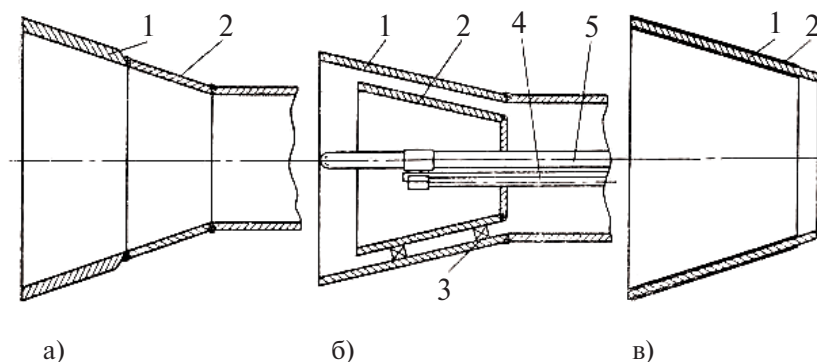


Рис. 9.41. Промежуточные конструктивные решения по увеличению надежности конуса горелки котла типа П-57:

- а) составной конус: 1 — выходная часть конуса, сплав 03Х25 Н25 ЮТ;  
2 — входная часть, сталь 20Х23 Н18;
- б) конструкция с внутренним конусом: 1 — конус основной, 2 — конус внутренний, 3 — дистанционирующая пластина, 4 — запальник, 5 — форсунка;
- в) конус горелки с плазменным напылением: 1 — конус основной, 2 — напыление

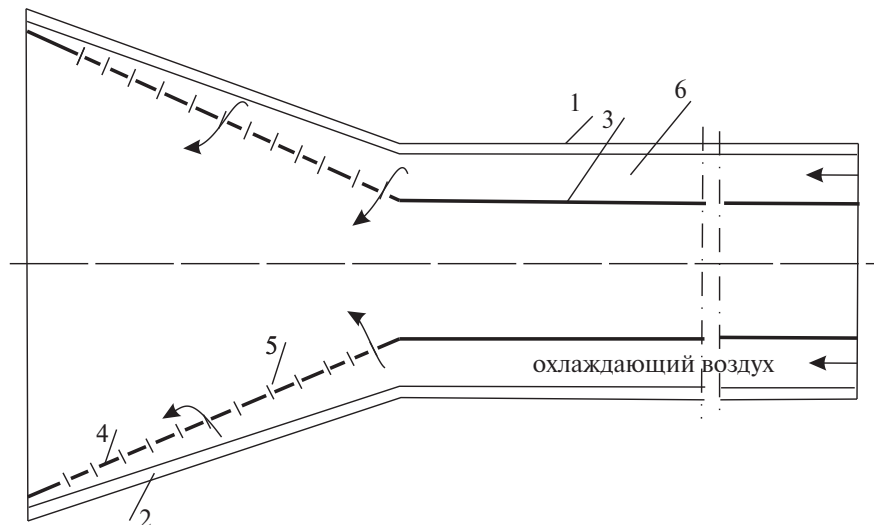


Рис. 9.42. Конус пылеугольной горелки котла П-57 с перфорированным охлаждаемым экраном:

- 1 — центральная труба горелки; 2 — конус; 3 — патрубок для крепления экрана и организации канала подвода охлаждающего воздуха;
- 4 — перфорированный экранирующий тонкостенный конус; 5 — отверстия для выхода охлаждающего воздуха; 6 — канал для подвода охлаждающего воздуха

### *3) Предотвращение абразивного износа.*

Из конструктивных элементов горелки наиболее уязвимыми к абразивному воздействию угольной пыли являются входной поворотный патрубок аэросмеси, продольная труба канала аэросмеси. На ТЭС обычно используют упрочнение элементов горелки плитками каменного литья, абразивной замазкой по сетке «рабица», прутками диаметром до 16 мм с шагом около 10 мм. Эти работы выполняются на ТЭС силами ремонтного персонала, что не всегда обеспечивает необходимое качество защитных устройств. Поэтому представляется наиболее перспективным выполнение защитных устройств, покрытий на специализированных предприятиях.

Из таких способов защиты горелок от абразивного износа рассматривается нанесение износостойких неметаллических покрытий алюмотермическим способом, основанным на центрифугировании в полости вращающейся трубы расплава продуктов экзотермической реакции между алюминиевым порошком и железной окалиной. Температура расплава составляет 1950–2000 °С. Образующееся износостойкое корундовое покрытие толщиной от 10 до 20 мм устойчиво к ударным воздействиям, не требует дополнительной обработки поверхности. Конструкции с таким покрытием менее громоздки, чем при установке камнелитых пластин.

При упрочнении горелок блоков 300 МВт Рефтинской ГРЭС алюмотермические покрытия толщиной 11 мм наносились на гнутые участки трубопровода аэросмеси с углами 90, 52 и 48°, на прямой участок длиной до 2 м. Расход материала для футеровки одного погонного метра трубы Ø 530×12 мм: порошок алюминиевый — 20 кг, железная окалина — 100 кг. Опыт эксплуатации горелок, защищенных от абразивного износа таким способом, показал его высокую эффективность. Необходимость ремонтно-восстановительных работ в межремонтный период на таких горелках исключается.

Простота технологии нанесения алюмотермических покрытий позволяет организовать соответствующие производственные участки в составе предприятий централизованного ремонта оборудования крупных ТЭС.



## Литература к разделу 9

1. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959.
2. Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. Энергия, 1986.
3. Худокормов Н. Н., Мищенко Е. В. Акустические горелочные устройства как один из способов повышения эффективности сжигания топлива и снижения себестоимости производства тепловой энергии // Необратимые процессы в природе и технике : Тр. 6-й всерос. конф., Москва, 26–28 янв., 2011. В 3 ч. М. : МГТУ, 2011. Ч. 2. С. 238–242.
4. Эффективность технологии использования механоактивированных углей микропомола для розжига и подсветки угольных котлов действующих ТЭС и проблемы ее внедрения / А. П. Бурдуков [и др.] // Горение твердого топлива : VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 нояб. 2012. Ин-т теплофизики СО РАН. Новосибирск, б. и., 2012.
5. РТМ 108.030.120–78. Горелки прямоточные пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования. Группа Е 02. Введ. 06.01.78.
6. Зильберман Д. И. Повышение экономичности и надежности шахтно-мельничных топок. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958.
7. Рабинович О. М. Котельные агрегаты. М. ; Л. : Машгиз, 1963.
8. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. М. : Энергия, 1976.
9. Шатиль А. А. Топочные процессы и устройства (исследование и расчет). СПб. : б. и. 1997.
10. Опыт проведения пуско-наладочных работ на головном котле ТПП-804 при сжигании природного газа / В. Г. Козлов [и др.] // Электрические станции. 1988. № 6.
11. Иванов Ю. В. Основы расчета и проектирования газовых горелок. М. : Гостоптехиздат, 1963.
12. Сигал И. Я. Газогорелочные устройства котельных установок. Киев : Гостехиздат УССР, 1962.

13. Спейшер В. А. Мазутные и газомазутные горелки. М. : [б. и.], 1974.
14. Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топками. Методы расчета и проектирования. ОСТ 108.030.26—78.
15. Бабий В. И., Куваев Ю. Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М. : Энергоатомиздат, 1986.
16. Коваленко А. Л., Чупров В. В., Козлов В. Г. Исследование топочной камеры котла ТГМП-204 П с подовой компоновкой горелок // Теплоэнергетика. 1985. № 4. С. 25—28.
17. Христич В. А., Любчик Г. Н. Струйно-стабилизаторные газогорелочные устройства и их применение в энергетике и промышленности. М., 1970. С. 20.
18. Хоменок Л. А. Создание горелочных устройств камер дожигания котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2007. № 9.
19. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб., 1996.
20. Мейкляр М. В., Стенинг А. И. Паровые котлы ТКЗ. М. ; Л. : ГЭИ. 1957.
21. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики) : справочник / А. А. Винтовкин, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусевский, А. Б. Усачев. М. : Машиностроение-1, 2001. 487 с.
22. РТМ 108.132.02—81. Горелки унифицированные пылеугольные. Типы, основные параметры, размеры и технические требования. Введ. с 01.07.82
23. Росляков П. В. Малотоксичные горелочные устройства : учеб. пособие. М. : МЭИ, 2002.
24. Соболев В. М. О некоторых особенностях топочного процесса, протекающего при использовании горелок типа ГМПВ // Электрические станции. 2005. № 7. С. 8—12.
25. О снижении выбросов  $\text{NO}_x$  в котле ПК-39 Аксуской теплоэлектростанции / М. А. Бухман [и др.] // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. 2003. № 10.
26. Патент РФ № 2038535 Серант Ф. А. и др. Пылеугольная горелка с низким выходом оксидов азота.
27. Шульман В. Л., Горяев Ф. В., Дегтярев М. Б. Оценка экологической эффективности реконструированных горелок котлов БКЗ-420—140—5 Омской ТЭЦ-5 // Энергетик. 2011. № 9.

28. Экологическое совершенствование двухпоточных (сдвоенных) угольных горелок / В.Л. Шульман [и др.] // Горение твердого топлива : VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13–16 нояб., 2012. Ин-т теплофизики СО РАН.
29. Горелка с расщеплением потока аэросмеси. Патент US6116171 НКИ 110/263.
30. Горбаненко А.Д., Морозов О.В. Сжигание природного газа в забалластированном окислителе // Теплоэнергетика. 1991. № 3. С. 38–40.
31. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании. Л. : Недра, 1988.
32. Барышев В.И., Березин В.Я. Влияние места ввода газов рециркуляции в горелку на выброс окислов азота при сжигании мазута // Электрические станции. 1980. № 9.
33. Потапов В.Н., Волков Е.В. Управление работой вихревой горелки с помощью периферийного струйного вдува // Проблемы аэродинамики газоздушных трактов котельных агрегатов : тезисы докладов Всесоюзной конференции. Барнаул, 1989.
34. Атлас котельных агрегатов / под ред. А.П. Ковалева. М. : ГЭИ, 1958.
35. Разработка и внедрение муфельизированных предтопков для снижении технического минимума пылеугольных котлов / А.И. Цепенков [и др.] // Горение твердого топлива : сб. материалов VIII Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012 г.
36. Внедрение системы термической подготовки углей для организации муфельной растопки и подсветки факела топочных камер сгорания на современных ТЭС / В.А. Дубровский [и др.] // Электрические станции. 2007, № 8.
37. Использование плазменной технологии воспламенения твердого топлива на пылеугольных тепловых электростанциях / В.Е. Мессерле [и др.] // Энергетик. № 7. 2012.
38. Разработка растопочной пылеугольной горелки / Б.В. Берг [и др.] // Электрические станции. 2012. № 10. С. 22–27.
39. Сеулин Н.А., Видин Ю.В. Модернизация муфельных горелок // Промышленная энергетика. 1988. № 4. С. 13–14.

40. Ницкевич Е. А. Проектирование котельных агрегатов. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1951.
41. Карпенко Е. И., Мессерле В. Е., Молонов Я. Ж. Плазменная стабилизация выхода жидкого шлака в топках котлов с жидким шлакоудалением // Горение и плазмохимия. Алма-Ата. 2009. № 1. Т. 7.

---

## **10. ТОПЛИВО- И ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕ ГОРЕЛОК КОТЛА**

---

**О**сновной проблемой в организации топливо- и воздухоснабжения горелок всегда остается стабильность подачи топлива и воздуха, обеспечение равномерного распределения этих реагентов либо наперед заданной неравномерности подачи их [1; 2]. Устоявшиеся проектные решения, отраженные в нормативных документах [3–5], определяют набор возможных вариантов в соблюдении указанных требований. Однако развитие топочной техники порождает необходимость расширения круга возможных решений, учета ряда дополнительных ограничений.

### **10.1. Оптимизация системы воздухоснабжения горелок**

---

Одной из основных проблем, которая решалась в организации воздухоснабжения пылеугольных горелок, являлся выбор транспортирующего агента для подачи угольной пыли к горелкам. Приходилось учитывать неоднозначные факторы:

- полное выгорание топлива достигалось при подаче всего воздуха через горелки;

— при транспортировке пыли высокореакционных топлив горячим воздухом возможно загорание пыли в пылепроводах.

По данным исследований [6] при сжигании каменного угля для двух различных способов подачи пыли — сушильным агентом (температура аэросмеси — до 200 °С, температура горячего вторичного воздуха — 380 °С) и горячим воздухом с температурой 70 °С — КПД брутто котла для первого способа на 1,3 % выше, чем для второго. Такое различие связано с более благоприятными условиями для выгорания топлива.

Оптимальная температура горячего дутьевого воздуха устанавливается, прежде всего, с учетом условий надежного воспламенения угольной пыли. Для тощих углей, антрацитов требовалась максимально возможная температура вторичного воздуха. Для антрацита температура вторичного воздуха достигает 380–420 °С, температура аэросмеси до 200 °С. Для углей высокореакционных с большим выходом летучих (бурые, каменные) по условиям взрывобезопасности температура аэросмеси ограничивается на уровне 70 °С, для вторичного воздуха — 250–280 °С. Для экибастузского угля температура аэросмеси принимается до 140 °С.

В некоторых конструкциях горелок используются встроенные измерительные вставки типа трубы Вентури. Получаемые данные поступают в информационный блок АСУ ТП [7].

Так, газомазутные горелки *Todd Combustion* (рис. 10.1) котла ТГМЕ-206 Тюменской ТЭЦ-2 содержат три воздушных канала:

1) *центральный* (8 % общего расхода воздуха) получает закрутку в аксиальном лопаточном завихрителе и обеспечивает стабилизацию факела;

2) *основной* — воздух поступает в топку прямотоком через профилированную трубу Вентури, обеспечивающую повышение эффективности внешней рециркуляции топочных газов для периферийной стабилизации прямоточного факела, а также для измерения расхода воздуха по этому каналу;

3) *третичный* — осуществляет подвод прямоточного воздуха по кольцевому каналу вокруг трубы Вентури, который регулирует раскрытие факела.

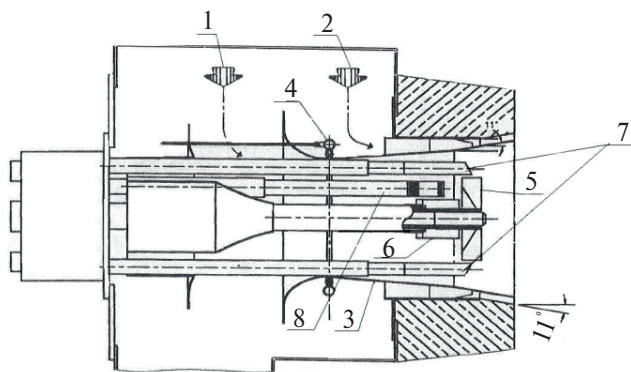


Рис. 10.1. Прямоточно-вихревая горелка *Todd Combustion* с измерителем расхода воздуха в виде трубы Вентури:

1 — ввод основного потока воздуха; 2—ввод третичного (кольцевого) потока); 3 — труба Вентури, образующая основной канал воздуха; 4 — датчики давления в горловине трубы Вентури; 5 — завихритель центрального воздушного потока; 6 — центральная газораздающая труба; 7 — газораздающие трубы периферийного топлива; 8 — запальник

Значительное внимание уделяется равномерному распределению воздуха по горелкам. На рис. 10.2 показана оптимальная трассировка индивидуальных воздухопроводов к угловым горелкам, обеспечивающая идентичность конфигурации и равенство сопротивления воздушного тракта к каждой группе горелок.

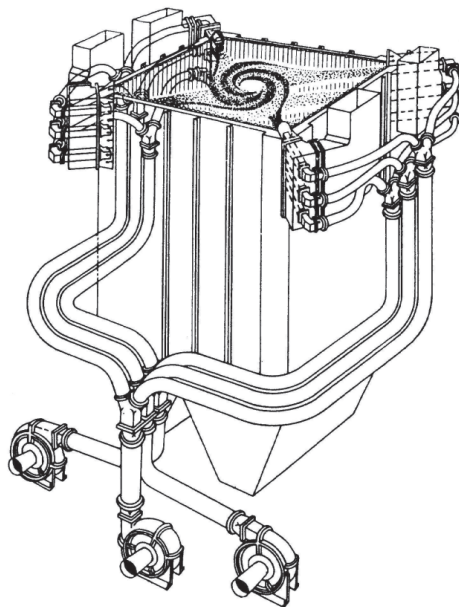


Рис. 10.2. Трассировка воздухопроводов к угловым горелкам



Методическими указаниями [4] предусматривается оснащение крупных котлов паропроизводительностью свыше 1600 т/ч общими коробами — воздуховодами вторичного воздуха, с отводами к отдельным горелкам. При этом контролируется **общий расход воздуха на группу горелок**. Для равномерного распределения воздуха по горелкам необходимо ограничение скорости воздуха в воздушных коробах до 8–10 м/с (рис. 10.3).

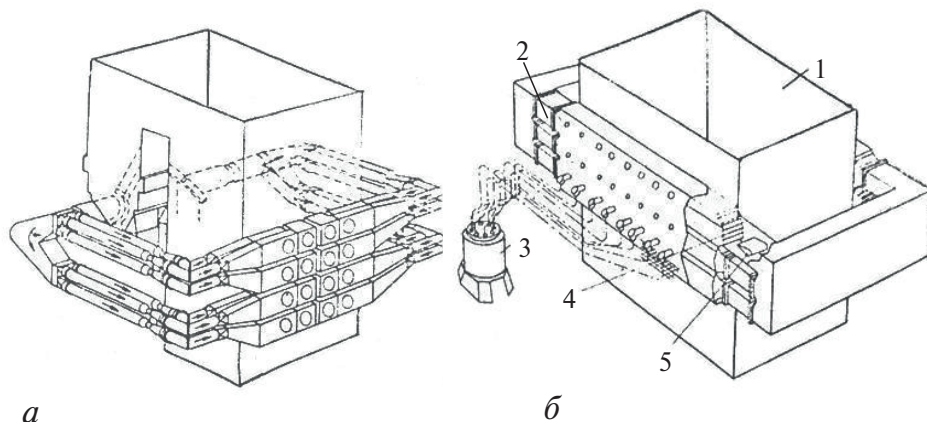


Рис. 10.3. Конструктивное выполнение систем воздуходобавления горелок:

*а* — система воздуходобавления с индивидуальным регулируемым подводом воздуха к каждой горелке (котел 250 МВт ТЭС, Нант-Шевире, Франция);

*б* — поярусный блочный подвод воздуха к горелкам с помощью секционированного короба (фирма «Бабкок — Вилкокс»);

1 — топочная камера; 2 — блочные короба вторичного воздуха;

3 — среднеходная мельница; 4 — регулирующие шибера (общие на каждый короб блока горелок, связанных с одной мельницей); 5 — измеритель расхода вторичного воздуха на каждый короб

Для контроля и поддержания расчетного избытка воздуха в каждой горелке зарубежные фирмы применяют короба вторичного воздуха с внутренними перегородками, позволяющими осуществлять **индивидуальное регулирование и точное измерение расхода воздуха на отдельные горелки**. Создание такой системы регулирования и контроля подачи воздуха на горелки позволяет поддерживать оптимальный скоростной режим каждой из них, соответствующий минимальному выходу оксидов азота при сохранении необходимых приемлемых условий воспламенения и выгорания пылеугольного факела.

*Резервирование источников дутьевого воздуха*

Требования к резервированию источников дутьевого воздуха содержатся в нормах технологического проектирования ТЭС [3]:

1. Характеристика дымососов и дутьевых вентиляторов выбирается с учетом запасов против расчетных величин: 10 % по производительности и 20 % по напору для дымососов и для вентиляторов по напору 15 %.

2. При номинальной нагрузке котла дымососы должны работать при КПД не ниже 90 %, а вентиляторы — не ниже 95 % максимального значения.

3. При установке на котел двух дымососов и двух дутьевых вентиляторов производительность каждого из них выбирается по 50 %. Для котлов на АШ и тощих углях в случае работы одного дымососа или одного дутьевого вентилятора должна быть обеспечена нагрузка котла не менее 70 %.

4. Для котлов паропроизводительностью 500 т/ч и менее, а также для каждого котла дубль-блока устанавливаются один дымосос и один вентилятор, установка двух дымососов и двух вентиляторов допускается только при соответствующем обосновании.

## **10.2. Системы топливоснабжения горелок пылеугольного котла**

---

При формировании системы топливоснабжения топки пылеугольного котла рассматривались и решались следующие вопросы:

- равномерность распределения пыли между горелками, связанными с общим пылеразмольным устройством в системе прямого вдувания;
- ограничение абразивного износа пылепроводов;
- распределение аэросмеси в системе трехступенчатого сжигания между основной горелкой и восстановительным поясом в заданном соотношении;
- в ряде случаев возникала необходимость дифференцированного распределения угольной пыли между горелками по фракционному составу при организации ступенчатого сжигания;
- предотвращение отложения угольной пыли в пылепроводах.

К настоящему времени уже сложился комплекс технических решений, охватывающих указанные вопросы и обеспечивающих их эффективное применение. В общем виде этот комплекс представлен в табл. 10.1 [5].

Таблица 10.1

**Технические решения для системы топливоснабжения котла**

Проблема	Способ, условия решения проблемы
Возможность отложения пыли в пылепроводе	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Минимально допустимая скорость аэросмеси на горизонтальном участке — 25 м/с, для прямого вдувания пыли — 18 м/с;</li> <li>2. Оптимизация конфигурации пылепроводов — минимальное число гибов, радиусгиба не менее диаметра пылепровода</li> </ol>
Неравномерное распределение топлива по горелкам	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Минимальное различие трассировки пылепроводов к группе горелок;</li> <li>2. Применение пыледелителей сепаратора оптимальной конструкции — например, с усреднением потока;</li> <li>3. Применение пыледелителей на трассе пылепроводов на вертикальных и горизонтальных участках;</li> <li>4. Одностороннее расположение мельницы и обслуживаемых ею горелок</li> </ol>
Эрозионный износ пылепроводов	Внутренние противоабразивные покрытия пылепровода (алюмотермические, облицовка камнелитыми накладками, выполнение защитных металлических покрытий и футеровки)
Дифференциация потоков топлива по фракционному составу	Применение пылеконцентраторов вихревого типа, пылеотводящие патрубки из зоны наибольшей концентрации общего пылепровода

Представленный набор апробированных технических решений составляет не только историческую ценность как долгий поучительный путь к оптимальным решениям, он позволяет современному инженеру находить в нестандартных условиях наилучшие выходы, используя уже известные находки и руководствуясь логикой эффективно-

го инженерного поиска. Ниже рассмотрим по существу содержание таблицы 10.1.

### 10.2.1. Равномерность количественного распределения топлива по горелкам

Допустимая неравномерность распределения воздуха по горелкам оценивается, согласно [4], по соотношению значений максимального и минимального коэффициента избытка воздуха в горелках:

$$\Delta\alpha^r = (\alpha_{\text{макс}}^r - \alpha_{\text{мин}}^r) / \alpha^r \leq 0,05.$$

Актуальность этой проблемы нарастала по мере увеличения единичной мощности котлов с соответствующим увеличением числа горелочных устройств — 12 горелок на полутопку котла ПК-39 (экибастузский уголь), 24 горелки котла П-57 (экибастузский уголь), 32 горелки котла П-57 (канско-ачинские угли), 48 горелок в проекте котла ТПП-804 на кузнецком угле. При этом число автономных пылесистем с мельницей не превышает 8 единиц. С этим связан большой объем публикаций по данной теме [8–12].

Неравномерность расхода пыли по горелкам оценивается величиной относительного расхода пыли  $\Delta g$ :

$$\Delta g = g_{\text{макс}} - g_{\text{мин}},$$

$$g_i = G_i / \Sigma G,$$

где  $G$  — абсолютный расход пыли.

Наиболее сложная ситуация складывается при наличии пылесистем прямого вдувания. Неравномерность распределения пыли от одного источника к большой группе горелок связана с различием конфигурации, протяженности пылепроводов и различием аэродинамического сопротивления трактов аэросмеси. Существенный вклад вносит неравномерность раздачи пыли в головке сепаратора по отводящим пылепроводам. Допустимая неравномерность расхода топлива по горелкам в этом случае оценивается величиной  $\Delta g = 0,2$ .

Исследования расхода пыли по горелкам котла ТПП-210 А энергоблока 300 МВт [11] показали неравномерность расхода пыли по горелкам до 60 %. На котле ПК-39 блока 300 МВт (экибастузский уголь) распределение пыли по трем горелкам полутопки, связанным с одной мельницей, характеризуется величинами 0,42–0,35–0,25 (измерения проводились с помощью нульмерной трубки).

Выравнивание расходов пыли до нормативного уровня осуществляется прежде всего совершенствованием пыледелителя, встроенного в сепаратор. В этом направлении выполнен обширный объем работ в поисках наиболее эффективного решения, которые представлены в отраслевых Методических указаниях [4]. Кроме того, при отсутствии компоновочных ограничений осуществляется оптимальное расположение мельниц и соответствующих горелок, рационализация трассировки пылепроводов.

Для пылесистемы с промбункером ситуация по пылепроводам решается таким же порядком, как и для пылесистемы прямого вдувания. Специфические способы применяются для начального участка пылепровода при смешении транспортирующего воздуха с потоком угольной пыли из промбункера, равномерного поступления топлива в каждый пылепровод от пылепитателя. Принципиальные изменения возникают при использовании транспорта пыли от бункера в высококонцентрированном потоке — вместо потока взвешенной пыли организуется псевдоожиженный поток аэросмеси, «плывущий» по трубопроводу с небольшой скоростью — 10–12 м/с.

В качестве рациональной компоновки пылепроводов и в целом всей системы пылеприготовления можно указать компоновку этого оборудования на блоках 500 МВт Рефтинской ГРЭС (экибастузский уголь). Здесь предусмотрена установка восьми молотковых мельниц производительностью по 40 т/ч по четыре с каждой стороны топки. Для сокращения длины питателей сырого угля бункеры топлива расположены с боков котла (рис. 10.4).

### **10.2.2. Стабильность перемещения пыли по пылепроводам**

Обстоятельные исследования условий нарушения стабильной транспортировки угольной пыли по пылепроводам [13; 14] позволили установить условия безопасной эксплуатации пылепроводов — скорость аэросмеси, угол подъема пылепроводов, протяженность тракта. Все эти ограничивающие параметры существенно зависят от конфигурации пылепровода, состояния внутренней поверхности труб, влажности пыли, однородности ее по фракционному составу, равномерности распределения пыли по сечению потока.

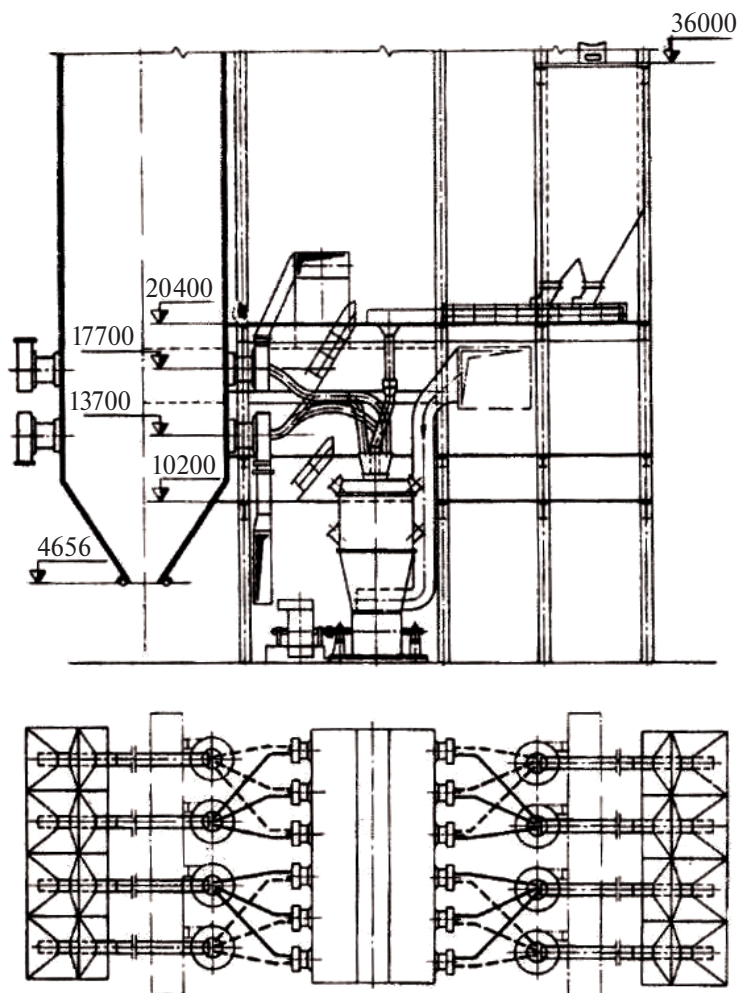


Рис. 10.4. Компонировка системы пылеприготовления блока мощностью 500 МВт на экибастузском угле

### 10.3. Система транспорта высококонцентрированной аэросмеси

Новым этапом в развитии топочной техники в последние десятилетия прошлого века явилось широкое внедрение систем транспорта и сжигания пыли высокой концентрации (ТПВК). Система

ТПВК реализуема при наличии пылесистем с промбункером, откуда угольная пыль с помощью пылепитателей отводится по вертикальным пылевым течкам к смесителям и далее поступает в потоке высококонцентрированной аэросмеси к горелкам. Эта технология была разработана еще в конце 30-х гг., но только с 70-х гг. началось ее интенсивное внедрение на многих ТЭС [15–21]. Принципиально важно отметить, что в развитии этой технологии в отечественной энергетике существенным импульсом послужили разработки специалистов Томь-Усинской ГРЭС. Здесь впервые была создана и отработана система транспорта пыли под давлением, получившая широкое признание.

Система ТПВК (рис. 10.5) предусматривает перемещение аэросмеси в трубопроводе с содержанием пыли до 40–50 кг/кг транспортирующего воздуха. В системе ТПВК принципиально изменяется механизм перемещения пылевидного материала. Если в типовых системах транспорта пыли имеет место перемещение взвешенных пылевых частиц поперек основного потока, то в высококонцентрированном потоке перемещение частиц в поперечном сечении ограничено смежными частицами при тесном их контакте, они ограничены в свободе перемещения и движутся вдоль трубопровода в псевдооживленном потоке. Здесь надежное перемещение пыли может осуществляться при меньших скоростях при той же производительности по пыли. Обеспечивается плотное движение пыли с заполнением ею всего сечения в канале. Граничная скорость потока соответствует заполнению пылевым потоком всего сечения трубы на всем протяжении канала.

В типовой системе подачи аэросмеси к горелкам котла, где движение частицы, увлекаемой воздушным потоком, относительно свободно, каждая частица может перемещаться в поперечном сечении, выходит из потока, образуя отложения. Для предупреждения сепарации пыли в пылепроводах скорость аэросмеси поддерживается на уровне 25 м/с, что в свою очередь порождает интенсивный абразивный износ пылепроводов, пыление их. В системе ТПВК при скорости аэросмеси в системе 10–12 м/с не наблюдается сепарации пылевых частиц, концентрация их по сечению пылепровода остается постоянной на всем протяжении пылепровода.



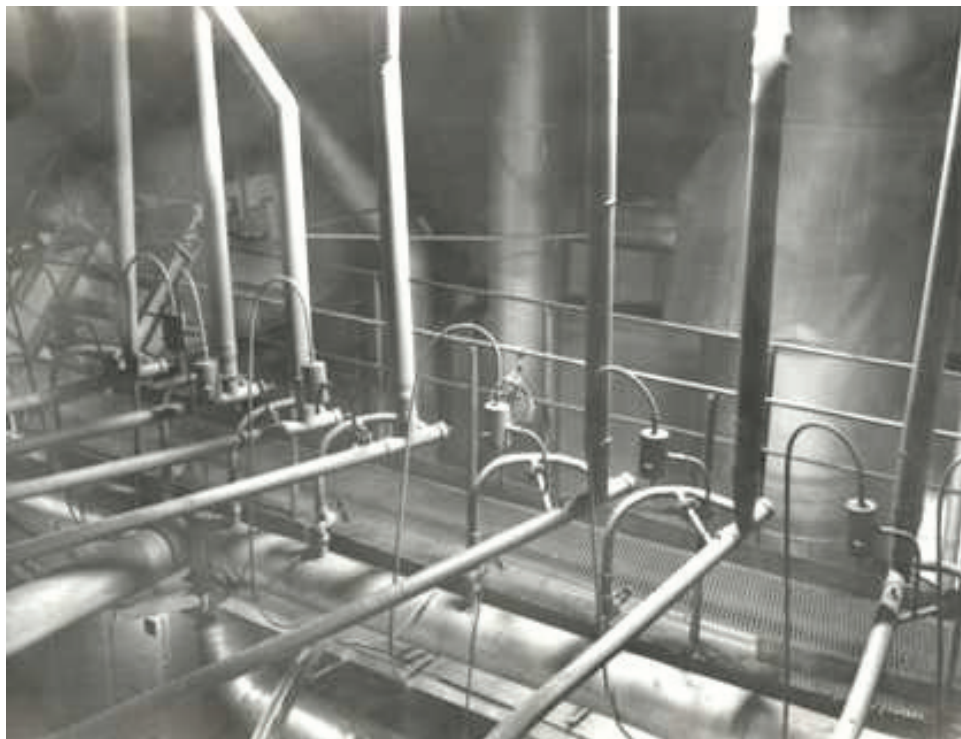


Рис. 10.5. Узел системы ТПВК — вертикальные пылевые точки, общий воздушный коллектор и воздухоотводящие патрубки к смесителям, смесители, пылепроводы высококонцентрированной аэросмеси к горелкам котла

Как показал практический опыт, стабильное движение высококонцентрированной аэросмеси требует соблюдения ряда требований к конструкции, трассировке пылепроводов:

- допустимые подъемные участки пылепровода до угла наклона не более 25–30 %;
- радиус гибов пылепроводов не менее 1,0 м;
- обеспечить высоту вертикальной пылевой точки от бункера пыли к смесителю в начальном участке пылепровода до 4 м.

К настоящему времени сложились два основных способа организации ТПВК для подачи пыли к горелкам котлов — под давлением (ТПВКд) и под разрежением (ТПВКр). Оба этих способа реализуются на большом количестве ТЭС и обеспечивают нормальную работу систем транспорта и сжигания высококонцентрированной аэ-

росмеси. Системы ТПВКр использованы на всех котлах Братской ТЭЦ, на ряде котлов Троицкой ГРЭС. Система ТПВКд эффективно служит на ТЭЦ, работающих на самых различных углях — экибастузском, кузнецком, ирша-бородинском, назаровском, донецком каменном. Принципиально их конструктивное различие связано с побудителем движения транспортирующей среды. На рис. 10.6 показаны различные варианты воздухоприемных камер и смесителей систем ТПВК.

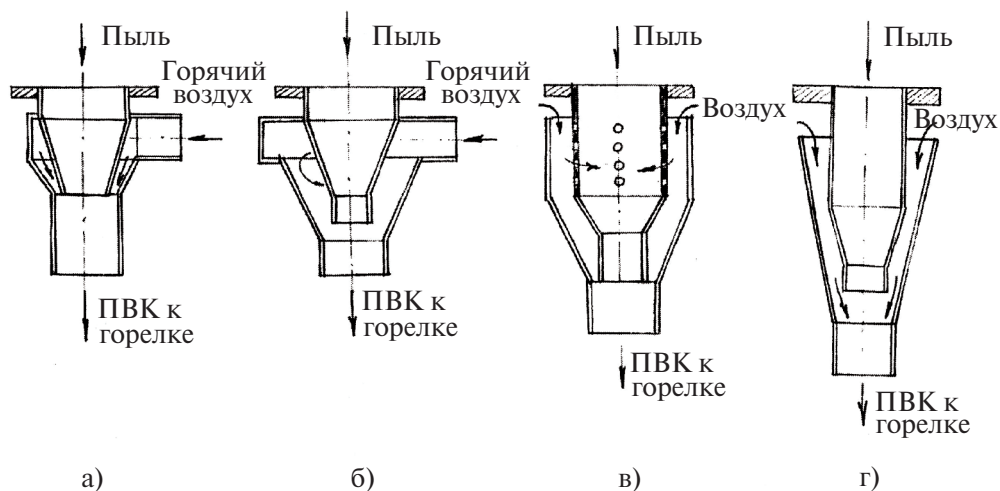


Рис. 10.6 Воздухоприемная камера и смесители систем ТПВК:

вариант с принудительной подачей горячего воздуха: а — диффузорный ввод воздуха; б — тангенциальный ввод воздуха;

вариант с открытой воздухоприемной камерой: в — струйный ввод через перфорированную рубашку; г — кольцевой воздушный канал

В системе ТПВКр создается разрежение на всем протяжении пылепровода от горелки до пылевой точки, за счет чего в смеситель поступает наружный воздух, обеспечивающий транспортировку угольной пыли к горелкам. Разрежение в полости пылепровода создается паровым эжектором (рис. 10.7), который размещается в выходном участке пылепровода на входе в горелку.

В системе ТПВКд транспортирующий воздух поступает в узел смешения с пылью под давлением до 0,02 МПа, создаваемым внешним источником — воздуходувкой. Чем же объясняется интерес к системам ТПВК?

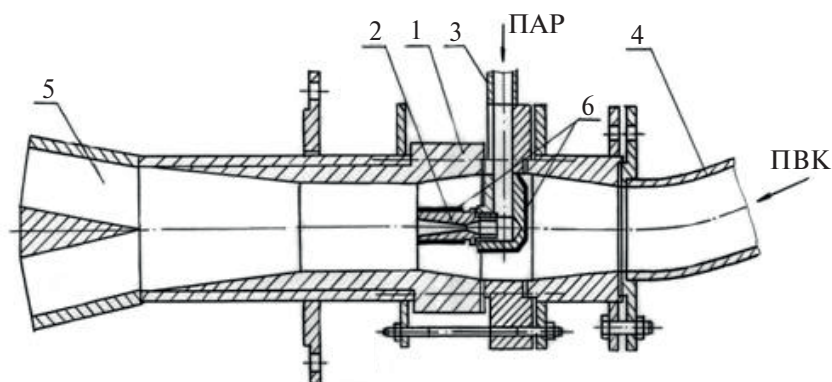


Рис. 10.7. Конструктивная схема пылепарового эжектора системы ТПВКр:

- 1 — корпус эжектора; 2 — сопло паровое; 3 — паропровод; 4 — пылепровод;  
5 — пылераздающий насадок; 6 — противозерозионное покрытие

Потенциальные возможности систем сжигания ПВК охватывают широкий круг процессов, касающихся наиболее существенных эксплуатационных свойств котлоагрегатов и совершенствования их конструкции, компоновки и условий эксплуатации котлоагрегатов:

- громоздкая система пылепроводов (по числу горелок) диаметром от 350 до 600 мм протяженностью до 70 м и диаметром 70–75 мм может быть замещена компактной системой пылепроводов, что упрощает обвязку котла, облегчает эксплуатацию и ремонт котла;
- устранение абразивного износа пылепроводов при скорости аэросмеси до 10–12 м/с;
- повышение устойчивости воспламенения и горения при сжигании ПВК;
- приспособленность к сжиганию топлива переменного качества;
- упрощение эксплуатационного обслуживания пылесистемы и котла в целом в связи с устранением громоздкой системы пылепроводов большого диаметра;
- улучшение схода жидкого шлака в котлах, имеющих топку с жидким шлакоудалением;
- уменьшение выбросов оксидов азота; сжигание пыли высокой концентрации является наиболее приемлемым технологическим методом подавления  $\text{NO}_x$ , не связанным со снижением температурного уровня процесса и ухудшением эксплуатационных характеристик котла.

Сравнительная оценка систем транспорта и сжигания ПВК под давлением и разрежением показывает следующее:

1) допустимый уклон пылепроводов — ТПВКр не может обеспечивать надежное перемещение пылевидного материала под уклоном вверх и по горизонтам, ТПВКд может осуществлять подачу аэросмеси с уклоном вверх до  $30^\circ$ ;

2) эксплуатационные расходы — складываются из стоимости транспортирующей среды, ремонтных затрат, амортизационных расходов, капитальных затрат на установку дополнительных воздушных средств, затрат на дополнительные топливо, сжигаемое в топке котла, в связи с поступлением в горелки холодного транспортирующего воздуха, расхода электроэнергии на привод пылепитателя. Учет указанных экономических показателей позволяет выявить для конкретных условий сравнительную эффективность сопоставляемых систем — ТПВК<sub>д</sub> и ТПВК<sub>р</sub>;

3) влияние на производительность пылепитателей — разрежение под пылепитателем в системе ТПВКр в 1,2–1,5 раза увеличивает подачу пыли, что в ряде случаев выводит рабочие обороты питания за пределы регулировочного диапазона. В системах ТПВК<sub>д</sub> приходится решать задачу предотвращения снижения производительности пылепитателя;

4) фильтрация транспортирующей среды через пылевой бункер — в системах ТПВКр отсутствие фильтрации воздуха через слой пыли позволяет поддерживать минимальный уровень слоя пыли — 3 м. При подаче высококонцентрированной аэросмеси под давлением необходимо конструктивными способами ограничить значительный подпор под питателем — использование определенной протяженности вертикальной пылевой течи;

5) безвозвратные потери химочищенной воды, конденсата — в системе ТПВКр имеют место безвозвратные потери химобессоленной воды до 2–2,8 % общего расхода питательной воды на котел;

6) надежность — опыт эксплуатации выявляет определенные преимущества ТПВК<sub>д</sub>, где отсутствует проблема износа паровых эжекторов, меньше вероятность забивания пылепроводов.

Для системы транспорта пыли под разрежением ТПВКр значительной проблемой является снижение расхода пара, являющегося побудителем расхода транспортирующего воздуха. Наиболее удачным является опыт внедрения такой системы транспорта пыли под разрежением на ТЭЦ-6 Иркутскэнерго. Здесь на десяти котлах

БКЗ-320—140, сжигающих ирша-бородинский уголь, используется пар с давлением 1,2 МПа, расход его на котел составляет 3—3,5 т/ч. В режиме сжигания ПВК снижен оптимальный избыток воздуха, достигнуто уменьшение концентрации оксидов азота в дымовых газах на 40 %. При этом необходимо учитывать поступление в топку значительного количества пара от инжектора-побудителя движения высококонцентрированной аэросмеси, что сказывается на увеличении тепловых потерь с уходящими газами  $q_2$ .

Возможности технологии транспорта и сжигания ПВК далеко не исчерпаны. Наблюдаемое повышение единичной мощности современных пылеугольных котлоагрегатов создает большие сложности в компоновке громоздких пылепроводов. Так, для котла блока 660 МВт с общим числом горелок до 48 единиц прокладывается соответствующее число пылепроводов диаметром 700 мм. Понятно, что в этом случае котел будет практически полностью опутан и закрыт пылепроводами. Естественно, здесь использование системы ТПВК с диаметром пылепроводов 70—80 мм может радикально изменить ситуацию.

Возможная неравномерность распределения пыли по горелкам в системе ТПВК под давлением может быть связана с неравномерной работой питателей пыли.

## **10.4. Совершенствование системы газоснабжения горелок газомазутного котла**

---

За последние десятилетия совершенствование систем газоснабжения энергетических котлов проходило в основном в направлении дальнейшей автоматизации, развития защит и блокировок. Целью является обеспечение безопасности, надежности системы газоснабжения, а также в целом соответствие требованиям промышленной безопасности производственных объектов.

Наиболее значимые изменения в газоснабжении котлов сводятся к следующим усовершенствованиям:

1. Для расширения диапазона устойчивой работы газовых горелок используется двухколлекторная система газоснабжения. Каждая горелка оснащается двумя кольцевыми газовыми коллекторами с автономным подводом газа и регулирующими органами.

2. Для исключения взрывов в топке при растопке котла расширено число пусковых горелок — по новым нормативным документам в розжиге факела могут принимать в качестве растопочных горелок все основные горелки. Поэтому все горелки в настоящее время при одноярусной и многоярусной компоновке должны оснащаться подводом пускового топлива с соответствующей арматурой.

3. Установка сдвоенной арматуры на газопроводе к каждой горелке.

4. Дальнейшая автоматизация, развитие защит и блокировок в системе газоснабжения.

## 10.5. Автоматизация систем газоснабжения

Большую роль в обеспечении надежности, эффективности и безопасности эксплуатации энергетических котлов играет программно-технический комплекс «АМАКС» [22; 23]. Он обеспечивает:

- внедрение безопасной технологии розжига и эксплуатации горелки при работе на газе;
- проверку герметичности газового оборудования перед розжигом и плавный розжиг горелок любой мощности на малых расходах газа и воздуха, что позволяет избежать хлопка в топке;
- блокировку всех неправильных действий оператора, т. е. из процесса розжига и обеспечения безопасности исключается так называемый человеческий фактор;
- автоматический розжиг горелок;
- погорелочное управление мощностью топки, что позволит исключить локальные перегревы и снизить содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах;
- приведение системы газоснабжения котла в полное соответствие Правилам безопасности в газовом хозяйстве («Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления» ПБ12–529–03).

Состав технологического оборудования комплекса:

- блок газооборудования БГ;
- комплект защитно-запального устройства (ЗЗУ);
- газовое оборудование на общем газопроводе котла;



– регулирующий шибер воздуха с электроприводом на воздуховоде к горелке.

Блок газооборудования БГ — техническое средство, позволяющее обеспечить безопасную технологию розжига и управления газовой частью горелки, а также регулирование расхода газа через нее от 0 до номинального значения.

Блок газооборудования БГ состоит из следующих элементов:

– два клапана отсечных с электроприводом (клапаны 1 и 2), обеспечивающие подачу/отключение газа к горелке (взвод плавный, закрытие мгновенное);

– клапан безопасности электромагнитный, обеспечивающий соединение с атмосферой межклапанного пространства (объема газопровода между клапанами 1 и 2) при закрытом состоянии клапанов;

– регулирующая заслонка с электроприводом, обеспечивающая управление расходом газа через горелку;

– клапан запальника электромагнитный, обеспечивающий управление подачей газа к запальнику;

– клапан опрессовки электромагнитный в комплекте с калибровочным дросселем и электроконтактным манометром, обеспечивающий возможность дистанционной/автоматической проверки плотности арматуры газового блока;

– ручные краны шаровые, используемые для ремонтного отключения арматуры блока. При работе блока они всегда открыты;

– ручной кран шаровой, использующийся при продувке газопровода перед БГ. При работе блока кран всегда закрыт.

Блок газооборудования БГ устанавливается перед каждой горелкой.

Комплект ЗЗУ состоит из электрозапальника с контрольным электродом, источника высокого напряжения и прибора контроля пламени горелки. ЗЗУ устанавливается перед каждой горелкой и входит в комплект поставки ПТК «АМАКС».

Газовое оборудование на общем газопроводе котла состоит из двух задвижек, кольца-заглушки, диафрагмы для измерения расхода газа, предохранительно-запорного клапана, регулирующей заслонки расхода газа на котел. Все это газовое оборудование не входит в комплект поставки ПТК «АМАКС», но по желанию заказчика может быть включено в поставку. Регулирующий шибер воздуха с электроприводом на воздуховоде к горелке необходим для обеспечения



плавного розжига на малых расходах воздуха и поддержания оптимального соотношения «газ — воздух» на каждой горелке. Шиббер воздуха и электропривод не входят в комплект поставки ПТК «АМАКС», но по желанию заказчика могут быть включены в поставку.

Реконструкция системы управления горелками на базе серийных средств ПТК «АМАКС» предполагает сохранение (с корректировкой в случае несоответствия современным нормам) существующих схем защит, блокировок и авторегуляторов. В ПТК «АМАКС» реализованы дополнительные (локальные) блокировки и защиты, обеспечивающие отключение только данной горелки. Для согласования действий средств ПТК «АМАКС» с существующими схемами защит и блокировок между ними осуществляется обмен информацией на уровне сигналов типа «сухой контакт». Комплекс универсален для котлов с любым количеством горелок, вплоть до 24.

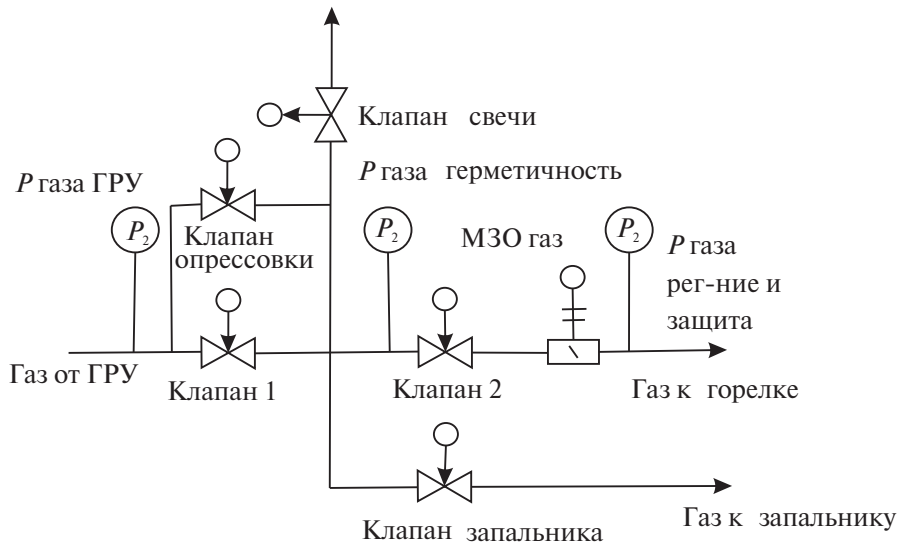
Комплекс предполагает автоматизацию только газовой части горелок, но при этом учитывает необходимость перехода (во время работы котла) на резервное топливо и обратно как с отключением горелки, так и без отключения. В комплект системы управления горелками ПТК «АМАКС» входит набор всех необходимых датчиков и приборов, позволяющих управлять горелкой и контролировать ее работу как дистанционно, так и по месту ее расположения.

Система управления горелками ПТК «АМАКС» реализует следующие функции:

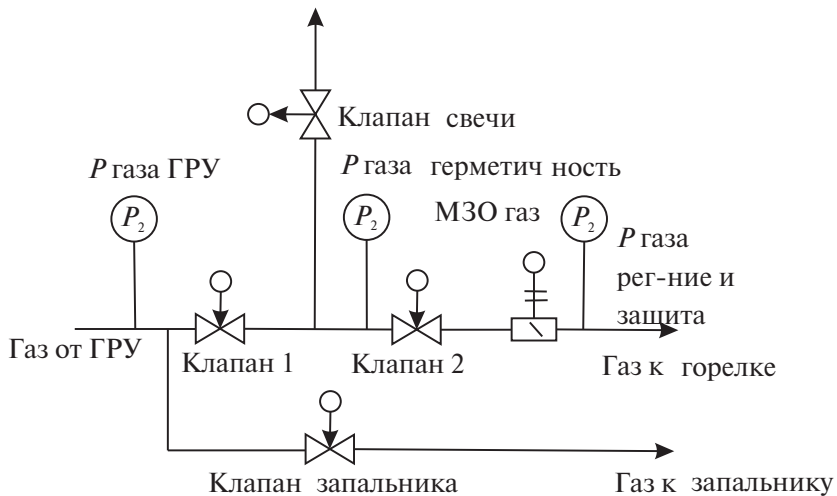
- автоматический (от нажатия пусковой кнопки), а при необходимости ручной (по месту) розжиг/отключение газовой части горелки;
- автоматическое отключение горелки при нарушении технологического процесса при ее розжиге или работе;
- автоматическое отключение всех горелок (по команде из существующих схем защит) при нарушении технологического процесса работы котла;
- автоматическое отключение или снижение мощности части горелок по команде «разгрузка» из существующих схем защит;
- автоматическое, дистанционное и местное управление мощностью каждой газовой горелки индивидуально (погорелочное управление мощностью);

- автоматическое, дистанционное и местное регулирование соотношения давлений «газ — воздух» перед каждой горелкой индивидуально (погорелочное управление качеством сжигания топлива);
- возможность разделения горелок на группы и дистанционное управление мощностью групп горелок в топке (дистанционное управление мощностью ведущей горелки в группе и автоматическое отслеживание ее мощности ведомыми горелками группы);
- дистанционное и автоматическое (от управляющих импульсов существующего на котле регулятора нагрузки) управление мощностью топки (при наличии одной ведущей горелки в топке);
- сохранение возможности управления мощностью по старой технологии (индивидуальные регуляторы расхода газа и воздуха на горелку полностью открыты, а расход газа и воздуха изменяется существующими регуляторами);
- возможность автоматического перераспределения мощности горелок по объему топки для исключения локальных перегревов;
- при многоярусном расположении горелок возможность снижения содержания  $\text{NO}_x$  в дымовых газах путем различной настройки качества сжигания топлива в горелках верхнего и нижнего ярусов;
- возможность перевода горелки на резервное топливо и обратно как с отключением ее на время перевода, так и без отключения;
- автоматическое и дистанционное регулирование заданного давления газа в газопроводе котла (необходимо регулировать при розжиге горелок в случаях, когда давление газа с ГРП более 0,08 МПа);
- отображение текущего процесса работы горелок на мнемосхемах (положение регулирующих органов, положение арматуры газовых блоков, значения измеряемых параметров и т. п.);
- регистрацию измеряемых технологических параметров во времени (давление газа, давление воздуха) каждой горелки;
- регистрацию во времени событий (плановых отключений горелок, аварийных отключений с указанием причины отключения и т. п.) протекающего технологического процесса.

На рис. 10.8 показаны схемы газового тракта с системой АМАКС.



**Схема газового тракта № 1:** 1 горелка, полная газовая схема с блоком клапанов «АМАКС»



**Схема газового тракта № 3:** 1 горелка, полная газовая схема

Рис. 10.8. Схемы газового тракта с системой «АМАКС» (часть 1)

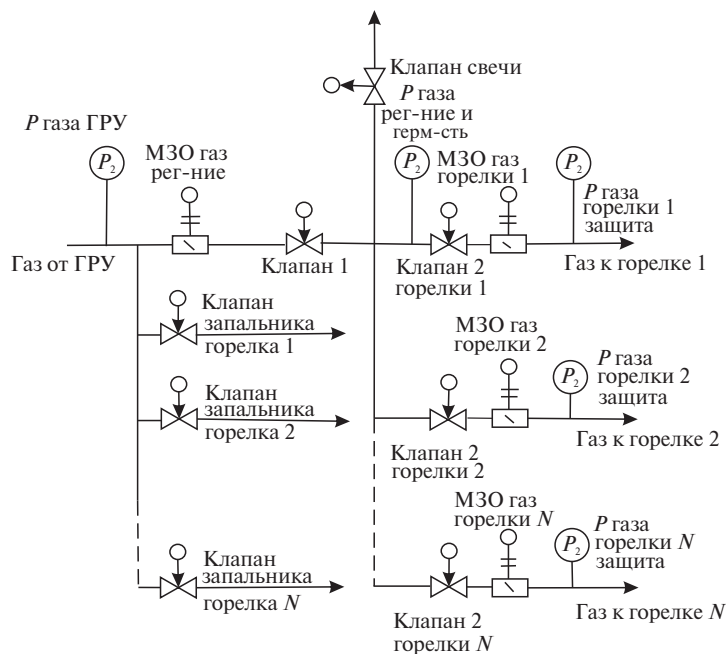


Схема газового тракта № 9:  $n$  горелок, один общий первый клапан-отсекатель

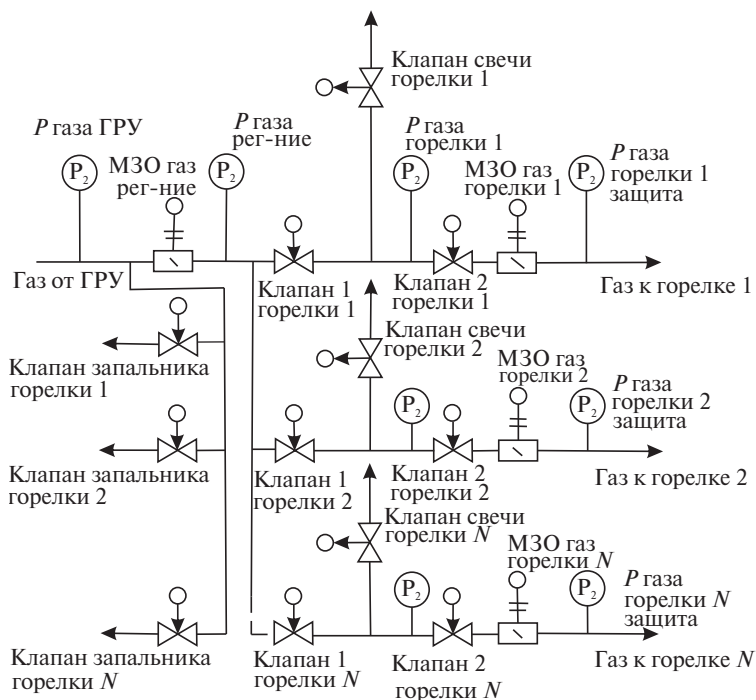


Схема газового тракта № 10:  $n$  горелок, полная газовая схема

Рис. 10.8. Схемы газового тракта с системой «АМАКС» (часть 2)

**Функции системы изменений, защит, блокировок в схеме газоснабжения:**

1. Обеспечивается измерение давления газа в газопроводе котла до и после регулирующего клапана;

2. Предусматривается оснащение следующими технологическими защитами:

2.1) действующими на отключение подачи газа на горелку при оснащении всех горелок котла ПЗК и ЗЗУ по не воспламенению или погасанию факела этой горелки;

2.2) действующими на отключение подачи газа на котел:

— при не воспламенении или погасании факела растопочной горелки в процессе розжига котла;

— при понижении давления газа после регулирующего клапана ниже заданных значений (при сжигании газа как вспомогательного топлива одновременно с другими видами топлива).

2.3) действующими на снижение нагрузки котла до 50 % при отключении:

— одного из двух дымососов;

— одного из двух дутьевых вентиляторов;

— одного из двух регенеративных воздухоподогревателей.

3. Котельная установка должна быть оснащена блокировками, запрещающими:

— открытие запорного устройства на газопроводе-вводе к котельной установке при открытом положении хотя бы одного запорного устройства на газопроводах перед каждой горелкой;

— включение ЗЗУ и подачу газа к горелкам без предварительной вентиляции топки котла в течение не менее 10 мин;

— розжиг горелок, не оснащенных ПЗК, пока все растопочные горелки не будут включены в работу;

— подачу газа в горелку в случае закрытия воздушного шибер (клапана) перед горелками или отключения вентилятора, работающего на эту горелку;

— подача газа в растопочную горелку и горелку, оснащенную ПЗК, при отсутствии растопочного факела на ее ЗЗУ;

— подачу газа в горелку, не оснащенную ПЗК, при отсутствии растопочного факела на ее запальном устройстве;

— открытие (закрытие) запорного устройства трубопровода, без опасность при открытом (закрытом) положении обоих запорных устройств перед горелкой (для вновь вводимых котлов).

4. На котельных установках должна быть предусмотрена сигнализация, оповещающая:

- о понижении или повышении давления газа после регулирующего клапана относительно заданных значений;
- о снижении давления воздуха в общем коробе или в воздухопроводах относительно заданного значения (кроме котлов, работающих под наддувом);
- о наличии факела на горелках котла, оснащенных ЗЗУ;
- о наличии растопочного факела ЗЗУ;
- о наличии растопочного факела ЗУ;
- о погасании факела в топке котла;
- о срабатывании защит.

5. Выполнение блокировок и защит на останов котла и перевод его на пониженную нагрузку должны осуществляться по техническим условиям, согласованным с заводом-изготовителем котельной установки или ведомственной нормативно-технической документации, согласованной с заводом-изготовителем.

6. Ввод и вывод защит и блокировок, препятствующих пуску или останову котла, должны осуществляться: для защит по погасанию общего факела и факела растопочной горелки — автоматически, для остальных защит и блокировок — либо автоматически, либо существующими в схемах защит средствами ввода-вывода. Вывод из работы устройств технологической защиты блокировок и сигнализации на работающем оборудовании разрешается только в случаях: необходимости отключения защиты, обусловленной производственной инструкцией по эксплуатации котла; очевидной неисправностью или отказом.

Отключение должно выполняться с разрешения начальника смены станции и с обязательным уведомлением главного инженера или начальника котельной. Ремонтные и наладочные работы в цепях включенных защит, блокировок и сигнализации без получения разрешения запрещаются.

7. Защита при не воспламенении или погасании факела любой растопочной горелки при растопке котла выполняется отдельно для газа и для мазута. Факел горелки контролируется индивидуальным прибором для каждого вида сжигаемого топлива или общим прибором на все виды топлива. Защита срабатывает при погасании факела горелки или не воспламенении топлива в процессе его розжига. Кон-

троль факела начинается через промежуток времени до 9 с после начала открытия запорного устройства на подводе газа к горелке и продолжается, пока защита введена. Для всех котлов, кроме пылеугольных котлов ЗиО, защита вводится автоматически при давлении газа перед котлом, превышающим установку защиты по понижению давления газа после регулирующего клапана, после начала открытия задвижки на подводе газа к любой растопочной горелке. Защита выводится либо при закрытии задвижки или ПЗК на газопроводе ввода к котлу, либо при вводе защиты «Погасание факела в топке».

Для пылеугольных котлов ЗиО защита вводится и выводится специальным ключом.

Защита действует на отключение всех запальных устройств, на немедленное закрытие ПЗК и запорного устройства на газопроводе-вводе к котлу, на подводе газа к запальным устройствам и ко всем горелкам, а также при погасании газового факела — на открытие трубопроводов безопасности (если на газопроводе к каждой горелке установлены по две задвижки с электроприводом).

8. Защита при погасании факела в топке срабатывает, если все приборы, контролирующие общий факел в топке (секции топки), зафиксируют его погасание, и действует на останов котла. Факел в топке (секции топки) контролируется для энергетических котлов не менее чем двумя комплектами приборов, для водогрейных котлов — одним комплектом.

Защита вводится автоматически при появлении сигналов о наличии факела от приборов контроля общего факела и если открыты задвижки на одном топливе ко всем растопочным горелкам. Защита выводится с выдержкой времени до 3 мин от момента срабатывания выходных реле защит, действующих на останов котла.

9. Защита по понижению давления газа после регулирующего клапана выполняется для энергетических котлов по схеме «два из двух», на водогрейных котлах — с одним датчиком. Давление контролируется до отвода к горелкам. На газовых котлах защита действует на останов котла. На котлах, сжигающих два вида топлива, защита действует на закрытие ПЗК и запорного устройства на газопроводе-вводе к котлу, на закрытие запорных устройств на подводе газа к горелкам (при наличии двух электрифицированных запорных устройств на подводе газа к горелке, а также если есть условия ввода защиты, — на останов котла).



Действие защиты на останов котла вводится:

- на газовых котлах — если давление газа за регулирующим клапаном выше уставки предупредительной сигнализации и начало открываться запорное устройство на подводе газа к любой растопочной горелке;
- на пылегазовых котлах — те же условия, что и для газовых котлов с дополнением, что переключатель топлива (ПТ) переведен в положение «Газ»;
- на газомазутных котлах — если давление газа за регулирующим клапаном выше уставки предупредительной сигнализации, расход мазута менее 35 % номинального и начало открываться запорное устройство на подводе газа к любой растопочной горелке.

Действие защиты на останов котла вводится:

- на газовых котлах — при срабатывании РОК или защиты «Невоспламенение» (см. п. 7);
- на пылегазовых котлах — при срабатывании РОК или защиты «Невоспламенение» или при переводе ПТ из положения «Газ» в другое;
- на газомазутных котлах — при срабатывании РОК или защиты по «Невоспламенению» или при расходе мазута больше 35 % номинального.

Действие защиты по прекращению подачи газа на котел вводится:

- для газовых и пылегазовых котлов — аналогично действию защиты на останов котла;
- для газомазутных котлов — если давление газа за регулирующим клапаном выше уставки предупредительной сигнализации, расход мазута больше 35 % номинального и начало открываться запорное устройство на подводе газа к любой растопочной горелке.

---

## Литература к разделу 10

---

1. Хазнаферов В. А., Московец Я. А. Повышение энергоэффективности котлов с форкамерными горелками посредством их автоматизации // Энергосбережение. 2015. № 1. С. 58–63.
2. Пути совершенствования горелок двухзонных камер сгорания / Д. Ю. Бантиков, О. В. Гречишников, В. В. Рогалев, А. Д. Росляков, Ю. И. Цыбизов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Коро-

- лева (национального исследовательского университета). 2014. № 5–2 (47). С. 88–94.
3. ВНТП 81. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций, 1981.
  4. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб., 1996.
  5. РД 153–34.1–03.352–99. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. М. : РАО «ЕЭС России», 1999.
  6. Шницер И. Н., Крук М. Т., Костык В. И. Сжигание каменного угля при различных схемах транспорта пыли к горелкам // Электрические станции. 1972. № 4.
  7. Марамзин С. А. Результаты испытаний малотоксичных горелок ЗАО «Экотоп» и фирмы *Todd Combustion* (США) на котлах ТГ-104 и ТГМЕ-206 при сжигании попутного и природного газа // Рационализация производства и потребления энергии : информ. сборник УралОРГРЭС. 2004. № 6.
  8. Лебедев Д. И., Сучков В. И., Галускин В. Б. Проблемы разделения аэроосеми по горелкам крупных котлоагрегатов и пути их решения // Надежность и экономичность работы котельного оборудования при сжигании экибастузских углей : сб. статей. 1985.
  9. Маслов В. И., Рабинович Я. Ф. Контроль за подачей пыли на отдельные горелки // Теплоэнергетика. 1963. № 12.
  10. Контроль распределения пылевидного топлива на горелки котлов ТЭС / Л. А. Кесова [и др] // Энергетика : экономика, технологии и экология. 2012.
  11. Исследование раздачи пыли по горелкам котла ПК-39 Ермаковской ГРЭС / А. Н. Алехнович // Электрические станции. 1989. № 7.
  12. Лейкин В. З. Основные закономерности и действие принципа минимальных затрат энергии при пневмотранспорте и распределении мелкодисперсной пыли в пылесистемах с прямым вдуванием // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 28.
  13. Пугач Л. И., Казанский А. Н., Лисицин В. В. Причины взрывов и загораний угольной пыли в пылепроводах и рекомендации и их защите. М. : Энергия, 1975.
  14. Левит Г. Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. М. : Энергоатомиздат, 1991.

15. Малис А. Я. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях. М. : Машиностроение, 1966.
16. Муравкин Б. Н., Бокша А. Г., Итман Д. Л. Методика расчета и опыт конструирования системы подачи пыли с высокой концентрацией в транспортирующем агенте // Труды ВТИ. Подготовка и сжигание пыли в крупных блоках. М. : Энергия, 1978.
17. Перевод котла ТАП-210 А, сжигающего кузнецкий тощий уголь, на подачу пыли высокими концентрациями / Б. Н. Муравкин [и др.] // Теплоэнергетика. 1990. № 2.
18. Иоффе В. М., Красавин А. А., Бондарев А. М. Применение системы подачи пыли высокой концентрации (ПВК) на котлах ПК-40 // Электрические станции. 1984. № 3.
19. Шульман В. Л., Глазков В. К., Маратканова Л. В. Снижение выхода оксидов азота при переводе котла ТП-87 на сжигание высококонцентрированной аэросмеси // Электрические станции. 1988. № 2.
20. Опыт эксплуатации систем высококонцентрированной подачи пыли к горелкам / А. Н. Казанский [и др.] // Энергетик. 1983. № 11.
21. Концентрированная подача угольной пыли в горелки котлов как средство снижения содержания оксидов азота / Л. И. Пугач [и др.] // Электрические станции. 1989. № 6. С. 14–19.
22. Личагин П., Ситников Ю. Автоматизация газовых горелок энергетических котлов // Энергослужба предприятия. 2004. № 3 (9).
23. Ситников Ю. В., Личагин П. А. Автоматизация газовых горелок энергетических котлов на базе ПТК «АМАКС» // Пром. АСУ и контроллеры. 2004. № 12. С. 14–17.

---

## 11. АЭРОДИНАМИКА ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

---

### 11.1. Основные факторы, определяющие структуру потоков в топочной камере

---

**К**онфигурация топочной камеры, способы компоновки в ней горелок, начальная аэродинамическая структура факела на выходе из горелки, способы ввода отработавшего сушильного агента в пылеугольных котлах и воздуха на формирование топливовоздушной смеси — все эти факторы в комплексе и во взаимодействии осуществляют организацию аэродинамической структуры потока в топочной камере. Затем уже следует развитие процессов смешения, воспламенения и выгорания топлива, теплообмена с ограждающими экранными испарительными и парогенерирующими поверхностями, шлакования, коррозии, образования загрязняющих вредных веществ. В целом аэродинамическое совершенство камерной топки определяется эффективностью использования полезного объема топки — уровнем теплонпряжения топочного объема, полнотой выгорания топлива, затратами на собственные нужды (тяга, дутье, подготовка топлива), надежностью поверхностей нагрева (проблемы шлакования, коррозии), экологичностью.

## 11.2. Прямоточные и вихревые аэродинамические структуры

Структура факела, характер потока продуктов сгорания складывается в результате турбулентного взаимодействия прямоточных и вихревых аэродинамических структур — спутных, встречных, поперечных, а также ограждающих поверхностей топочной камеры.

### 1) Начальные прямоточные струи в топке

Такие начальные аэродинамические структуры используются в призматической топке с настенной либо подовой компоновкой для выдачи в топку топливовоздушной смеси через горелки. Они поступают по нормали к оси топки в горизонтальной плоскости (настенная компоновка) либо по вертикали вдоль оси топочной камеры (подовая компоновка). Предусматривается использование также в качестве поперечных прямоточных струй различных газозвудушных сред — рециркулирующих дымовых газов, части воздуха в виде встречных струй напротив основных горелок и под некоторым углом к оси горелок на смешение с факелом, а также в зоне восстановления и дожигания при двух- и трехступенчатом сжигании. Все указанные прямоточные факела и потоки от вводов с настенной компоновкой разворачиваются в топке вдоль вертикальной оси, *формируя общий восходящий поток топочных газов.*

Прямоточные струи, выдаваемые тангенциально устанавливаемыми горелками, могут кардинально изменять аэродинамику топки, придавая ей вихревой высокотурбулизированный характер во всем сечении и объеме топки, вплоть до выхода из топки. В результате *прямоточные струи формируют вихревую топку.* Рассматриваемые вихревые топочные устройства образуют две основные группы, отличающиеся характером вихревых потоков в топочной камере. Тангенциальная, кольцевая топки отличаются наличием *единого мощного вихревого потока горячей аэросмеси и топочных газов с вертикальной осью вращения.* Здесь единый монолитный спиральный восходящий поток охватывает всю полость топочной камеры, исключая приосевую зону. Такая аэродинамическая структура обеспечивает воспламенение и стабилизацию факелов отдельных прямоточных горелок, сливающихся в единый факел.

Образование *вертикального парного вихря в нижней части топки* осуществляется также в системе нижнего дутья при подаче части вторичного воздуха плоскими смещенными струями вдоль наклонных скатов холодной воронки.

Таким образом, задачи стабилизации процесса горения и воспламенения топливо-воздушной смеси, смесеобразования и выгорания передаются от каждой отдельной горелки общему центральному вихрю.

## *2) Вихревые горелки в топочной камере*

Вихревая горелка самостоятельно осуществляет стабилизацию факела, интенсификацию смесеобразования, определяет протяженность факела, регулируемость вихревого факела без аэродинамической поддержки топочных структур. Эти свойства определили широкое использование вихревых горелок в топочных устройствах большой и малой мощности. При установке в камерной топке вихревых горелок складывается *система локальных вихрей с горизонтальной осью вращения*, порождаемых отдельными вихревыми горелками. Эти локальные вихревые потоки достаточно быстро затухают, вырождаясь в отдельные прямоточные струи, придают прямоточный характер общему потоку топочных газов. Таким образом, вихревые горелки вследствие быстрой размываемости вихревых структур формируют локальные вихревые зоны, охватывающие лишь часть того топочного пространства, в котором осуществляется прямоточное движение топочных газов. Можно констатировать, что *вихревые горелки не нарушают прямоточное движение продуктов сгорания в призматической топке*.

### **11.3. Структура потока в вихревой топке с тангенциальным вводом топливо-воздушной смеси**

---

В этой конструкции топочная камера непосредственно участвует в формировании структуры течения топочных газов. В результате аэродинамического взаимодействия потоков от отдельных угловых горелок (тангенциально ориентированных) в приосевой части топки создается вращательное движение в горизонтальной пло-

скости всего восходящего потока топочных газов. Аэродинамическая структура общего вихревого потока состоит из пристенного вихревого слоя вторичного воздуха и внутреннего вихревого потока обогащенной топливо-воздушной смеси, которые осуществляют воспламенения топливо-воздушных потоков от отдельных горелок и стабилизацию факела. Вращательно-поступательное движение монолитного факела приводит к смещению основной массы газов к периферии топки, где складывается область с повышенными скоростями, динамическими напорами, уровнем температуры. Наряду с этим центральным вихрем, охватывающим основную часть сечения топки, в углах призматической топки вследствие эжектирующего действия прямооточных струй возникают индивидуальные вихревые течения, определяющие воспламенение этих струй до их включения в общий вихревой поток.

Центральный вихрь пространственно разделяет два участка факела:

- зона начального развития индивидуальных прямооточных струй с замедленным смесеобразованием — здесь происходит конверсия связанного азота топлива в молекулярный азот; в этой зоне на уровне горелочного пояса замедлено тепловыделение, что снижает температуру факела;

- зона интенсивного завершения смесеобразования и догорание топливо-воздушной смеси — компенсирует затягивание этих процессов в начальном участке факела.

Аэродинамическая структура потоков в топочной камере с тангенциальной установкой горелок неоднородна. Спиральный восходящий поток топочных газов сохраняет интенсивное вращательное движение примерно до половины высоты топки [1]. На участке развития центрального вихря формируется в пристенной зоне опускное движение газов к плоскости установки горелок. Затем центральная малопроточная зона с вялым хаотичным движением (практически полезно неиспользуемая) замыкается за счет расширения и размывания вихря. Выше этой отметки по всей высоте топки наблюдается восходящий поток, в котором, однако, сохраняется неравномерное распределение массы топочных газов по сечению. В призматической топке прямоугольного сечения при отсутствии разделительного двухсветного экрана формируется два независимых вихря в каждой полутопке (рис. 11.1).



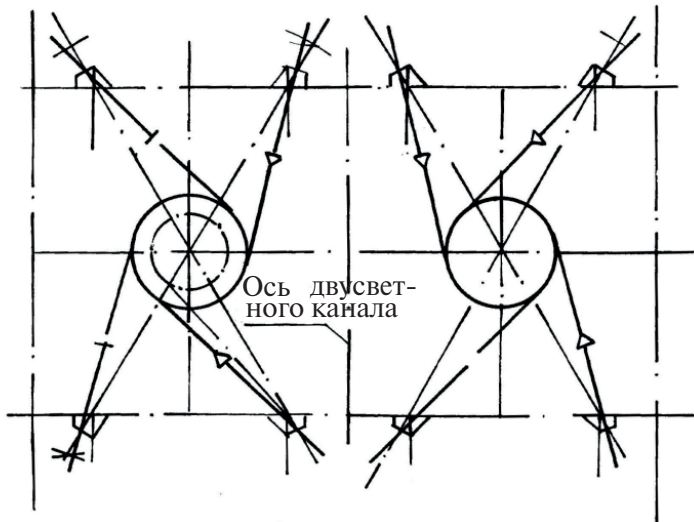


Рис. 11.1. Структура потоков в топочной камере с тангенциальной установкой горелок

Таким образом, не все топочное пространство эффективно заполняется факелом, приосевая область по существу является холостым объемом. Однако за счет интенсификации процессов в периферийной зоне, увеличения времени пребывания реагентов в реакционной зоне, увеличения роли конвективной составляющей радиационно-конвективного теплообмена и роста тепловосприятия экранов в итоге складываются благоприятные условия для сжигания топлива с учетом экологических ограничений [2].

Естественным развитием тангенциальных топочно-горелочных систем является создание кольцевой топки со *спиральным восходящим потоком топочных газов в кольцевом канале*. Для топки с тангенциальным вводом топливовоздушной смеси характерно слабое использование обширной центральной цилиндрической зоны топочного объема, располагаемой внутри охватывающего единого вихревого потока топочных газов. Логична идея изъять эту холостую зону из топочного пространства, установив внутреннюю кольцевую стенку с тепловоспринимающими экранными поверхностями.

### **11.4. Организация тангенциальной многосоставной вихревой горизонтальной аэродинамической структуры**

Многослойная кольцевая аэродинамическая структура, образуемая рядом концентрических вихревых струй (рис. 11.2), представляется более устойчивой и может сохраняться на большей высоте топки. Это свойство улучшает условия формирования состава топливо-воздушной смеси и ее выгорания. Здесь в большей степени ограничивается возможность контакта факела с экранными поверхностями. Однако убедительных экспериментальных данных, сведений об эксплуатационном опыте недостаточно.

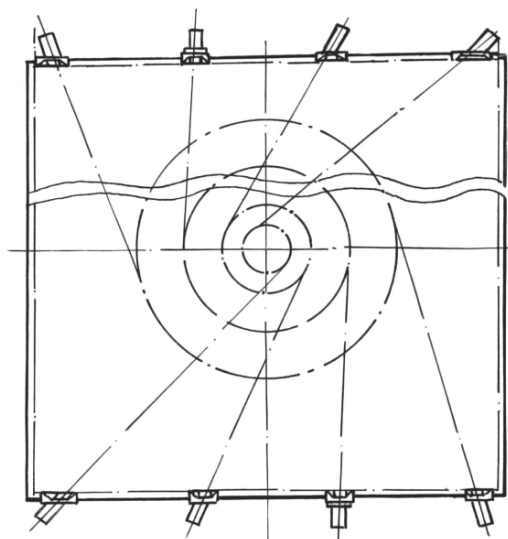


Рис. 11.2. Организация кольцевой многосоставной вихревой структуры в топке

### **11.5. Структура вихревого потока в топке при концентричном вводе аэросмеси и вторичного воздуха**

Формирование двух отдельных концентричных вихрей — аэросмеси (внутренний вихрь) и вторичного воздуха (наружный коаксиально развивающийся вихрь) — позволяет реализовать основной принцип

воздействия на образование оксидов азота — замедление смесеобразования. Эта схема осуществляется в топке с прямоточными тангенциальными горизонтально-щелевыми горелками путем отдельного развития на прямолинейном участке плоских струй аэросмеси и вторичного воздуха (рис. 11.3). Для этого сопла аэросмеси ориентированы по касательной к некоей условной окружности, ось которой совпадает с осью топки. Вариант подобной организации факела предусматривает дополнительный ввод части вторичного воздуха ниже сопел ввода аэросмеси.

Расположенные ниже, в одной вертикальной плоскости с соплами аэросмеси, щелевые каналы части вторичного воздуха (20–40 %) ориентированы вдоль струй аэросмеси (80–60 % вторичного воздуха). Ось воздушного потока отклоняется от струй аэросмеси на 20–25° к стенкам топки, формируя второй центральный вихрь, охватывающий вихрь аэросмеси. Как указывается в отраслевом методическом документе [3], разворот сопел вторичного воздуха в сторону экранов создает воздушную завесу, снижая опасность шлакования и газовой коррозии экранных труб.

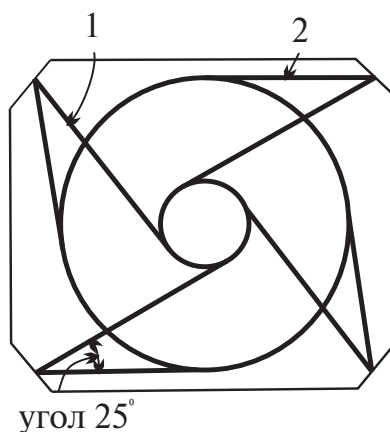


Рис. 11.3. Концентрическая организация центрального вихря:

1 — аэросмесь с некоторым количеством вторичного воздуха вдоль потока аэросмеси; 2 — основной поток вторичного воздуха

Одновременно (по различным данным) подобная структура позволяет снизить выход оксидов азота на 40 %. Такая схема организации аэродинамики топки представляет комбинацию двух различных технологий — концентрического и ступенчатого сжигания.

## 11.6. Структура вертикального вихревого низкотемпературного течения в топке

В качестве эффективного способа сжигания успешно используется низкотемпературное вихревое течение в вертикальной плоскости (НТВ). Здесь, так же как и в тангенциальной топке, выделяются две зоны горения:

- вихревое вертикальное циркуляционное течение в нижней части потока аэросмеси, где сжигается пыль угрубленного помола;
- восходящий линейный поток, в котором сжигается основная часть топлива.

### 11.6.1. Вихревые течения в зоне нижнего дутья

Система нижнего дутья (СНД) является важным фактором в организации топочного процесса. Одной из функций нижнего дутья является обеспечение выгорания наиболее крупных угольных частиц путем многократной циркуляции в специально организованной вихревой зоне, расположенной ниже горелочного пояса. На котле типа БКЗ420–140–5 организована система нижнего дутья (с подачей через холодную воронку до 20 % всего расчетного расхода вторичного воздуха) со встречно смещенными воздушными потоками, поступающими через прямоугольные сопла, расположенные на наклонных скатах холодной воронки (рис. 11.4). Струйные смещенные потоки горячего воздуха образуют V-образную аэродинамическую структуру, создающую вихревые течения в холодной воронке. Они захватывают часть пылевоздушных потоков, выходящих из горелок, осуществляя их воспламенение и выгорание, а также крупные угольные частицы, выпадающие из основного факела, в объеме холодной воронки. Сюда же вовлекаются высокотемпературные топочные газы. В результате в теплообменные процессы более активно включаются НРЧ и экраны холодной воронки. Повышается полнота выгорания топлива, снижаются тепловые потери  $q_4$ . Таким образом, сформирован двухзонный пылеугольный факел для раздельного сжигания угольной пыли угрубленного и проектного качества помола.

Опыт реализации СНД в пылеугольных котлах позволяет сделать следующие выводы:

1. Подача части воздуха помимо горелочных устройств в СНД является одной из форм организации ступенчатого сжигания. При этом на процесс снижения образования монооксида азота в факеле одновременно воздействуют несколько факторов, такие как уменьшения избытка воздуха в начальной стадии формирования факела и общего уровня температуры в зоне активного горения. По результатам наладки одного из котлов, снижение  $\text{NO}_x$  при реализации на котле СНД (при прочих равных условиях) составляет 20–30 %. СНД приводит к уменьшению потерь тепла с механической теплотой сгорания за счет уменьшения провала угольных частиц в холодную воронку.

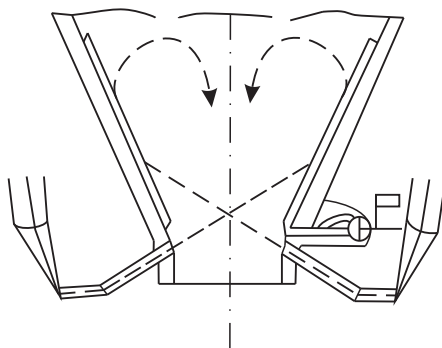


Рис. 11.4. Устройство ввода горячего воздуха в холодную воронку (нижнее дутье)

В результате совершенствования аэродинамики топки достигается существенный эффект по улучшению выгорания топлива:

- повышена устойчивость горения, минимальная нагрузка котла без подсветки факела мазутом снизилась до 50 %  $D_{\text{ном}}$ , до реконструкции минимум нагрузки составлял 70 %  $D_{\text{ном}}$ ;
- уменьшились потери топлива с провалом;
- производительность пылесистемы повысилась в 1,5 раза вследствие угрубления помола с  $R_{1000} \approx 2,0$  % до  $R_{1000} \approx 9,0$  %.

Реализация СНД является не только природоохранным мероприятием при повышении паропроизводительности котла, но и необходимым условием повышения мощности котла на 20–30 %, так как позволяет повысить тепловую эффективность топочной камеры.

### **11.6.2. Вихревые течения в топках с низкотемпературным вихрем**

При сжигании угля в топке с низкотемпературным вихрем (НТВ, ВИР-технология) складываются два вида течения — прямоточное (в которое вовлекается основная масса пылевоздушной смеси) и локальный вихрь в нижней части топки (обеспечивающий многократную циркуляцию наиболее трудно выгораемого топлива). Между собой эти два потока не взаимодействуют, поскольку они развиваются по различным траекториям и в различных зонах топочного объема. Но значение каждой из этих аэродинамических структур в формировании нового качества топочного процесса специфично и значительно, оно заключается во взаимодополнении и усилении общего позитивного эффекта.

## **11.7. Влияние отдельных конструктивных элементов топки на структуру потоков топочных газов**

---

1. Значительное влияние на характер течения топочных газов на выходе из топки оказывает *аэродинамический выступ*, особенно при работе котла на бурых углях с легкоплавкой золой. Для экранирования выступа используются трубы СРЧ и НРЧ. При установке такого выступа в ходе реконструкции котла ПК-33 (челябинский бурый уголь) удалось существенно изменить характер течения топочных газов в верхней части топки — устранены вихревые обратные токи, застойные зоны, обеспечено заполнение потоком газов всего выходного сечения топки, снижена температура газов и ликвидировано шлакование ширм [4]. В то же время для газомазутных котлов устранение пережима на существующих котлах типа БКЗ-320—140 ГМ не изменяет условий работы котла. Участок топки, занятый ранее выступом, после его устранения необходимо экранировать трубами из стали 12 Х1 МФ, так как температура металла труб может превышать допустимые значения для стали 20 [5].

2. Аэродинамическая структура потока топочных газов на выходе из топки определяется также способом отвода газов — одним потоком (в П-образной топке) или двумя разнонаправленными потока-

ми (в Т-образной топке). При одностороннем выводе топочных газов складывается значительная температурная неравномерность потока в поворотной камере, которую в определенной мере ослабляет аэродинамический выступ. При отводе топочных газов в две конвективные шахты Т-образного котла решаются конструктивные задачи по сокращению габаритов поворотной камеры.

3. Принципиальным образом изменяется структура потока на выходе из топки в башенном котле, в котором отсутствует высокотемпературная поворотная камера к конвективной шахте, — поток остается прямоточным, поступая в располагающийся над топкой водяной экономайзер. При этом сохраняется сложившаяся в топке равномерность поля скоростей и концентрации газовых и пылевых компонентов продуктов сгорания.

## **11.8. Роль отдельных начальных аэродинамических параметров факелов в формировании аэродинамики топочного пространства**

---

### **11.8.1. Крутка потока на выходе из горелки**

Следует отметить в некоторой степени парадоксальное влияния крутки потока на выходе из горелки на характер движения газов в объеме топки:

- вихревой факел не влияет на прямолинейный характер движения топочных газов в призматической топке, сохраняя ее прямоточный характер; закрученные потоки на выходе из вихревых горелок при развитии в топке создают локальные вихревые структуры, захватывающие топочные газы в нижней части топки;
- прямоточные струйные факела способны сформировать вихревую топку, в результате взаимодействия группы прямоточных струй организуется интенсивное крупномасштабное вихревое движение, охватывающее весь основной объем топки.

Таким образом, вихревые факелы не могут сформировать вихревую топку, в то время как система прямоточных тангенциально ориентированных потоков способна сформировать вихревое движение во всем объеме топочной камеры, образовав вихревую топку.



Следовательно, начальная аэродинамическая структура факела, в частности параметры крутки, не сказывается в конечном счете на аэродинамической структуре потока топочных газов.

### **11.8.2. Влияние дальнобойности факела на аэродинамические свойства топочного процесса**

Дальнобойность каждого отдельного факела имеет определяющее значение в развитии процессов коррозии, для распределения температуры в пристенной зоне топки, в процессах конвективного теплообмена с экранными трубами, локального проявления шлакования. Дальнобойность струи, развивающейся в топке, определяется исходными параметрами потока на выходе из горелки (скорость, диаметр амбразуры, закрутка, структура) и сносящим воздействием поперечного потока топочных газов. Она может быть оценена с достаточной точностью расчетным путем (см. раздел 2.2). Задача конструкторов и наладчиков — обеспечить оптимальное положение факела и продуктов сгорания в топке без непосредственного контакта с противоположной и боковой стенками при заданной интенсивности смешения.

### **11.8.3. Значение единичной мощности горелки для качества топочного процесса**

Обстоятельная оценка значимости единичной мощности горелок и их числа в топке дана в работе А. А. Шатиля [6].

Сравнивая интенсивность турбулентности в зоне развития факела малых и крупных горелок, можно констатировать, что уровень турбулентности и интенсивность смешения топлива с воздухом для малых горелок затухают по длине факела на более коротком участке [7]. С увеличением мощности горелок индивидуальные зоны рециркуляции охватывают все большую часть объема топки, способствуя интенсификации смесеобразования. Таким образом, по условиям выравнивания состава и температуры в топке малое число крупных горелок предпочтительнее большого числа малых горелок.

Оптимизация при этом аэродинамических процессов сопровождается улучшением условий воспламенения и выгорания топлива. Это связано с тем, что протяженность и мощность зоны рециркуляции топочных газов к корню факела пропорциональны диаметру амбразуры горелки. Соответственно, при переходе от малых к крупным горелкам увеличивается время пребывания топливо-воздушной смеси

в зоне эффективного горения, снижается максимум температур в факеле, выравниваются падающие потоки.

Экспериментальные сравнительные исследования топочного процесса на котле типа ТП-100 при использовании вихревых пылеугольных горелок различной мощности (35 и 70 МВт, соответственно 16 и 8 горелок, диаметры амбразур 1080 мм и 1500 мм) показали [8]:

- заполнение сечения топки основным потоком факела для крупных горелок существенно больше;
- отмечена большая интенсивность процессов воспламенения и горения для мощных горелок, для них температура газов на выходе из топки ниже на 50°;
- относительная дальнобойность факела (по отношению к размеру амбразуры) для сопоставляемых условий идентична, но абсолютная дальнобойность пропорциональна размеру амбразуры.

В результате на вновь создаваемых котлах после 70-х гг. единичная мощность горелок уже достигала 70 МВт.

### **11.9. Организация вводов в топку отдельных газо-воздушных потоков**

---

По ходу развития топочной технологии топочная камера все в большей мере становилась объектом вторжения различных газозвудушных, паровых и других сред, непосредственно не связанных с процессами воспламенения и горения:

- сброс избыточного первичного воздуха помимо горелок;
- нижнее дутье;
- встречные потоки воздуха (встречное дутье);
- защитные воздушные завесы;
- ввод горячего воздуха из системы эвакуации шлака;
- рециркуляция газов в верх топки;
- рециркуляция газов в низ топки;
- сброс сушильного агента;
- впрыск влаги.

#### **11.9.1. Сброс части воздуха в топку помимо горелок**

В периоды увеличения влажности угля требуется большее количество воздуха для его подсушки. Однако значительное возрастание ско-

рости первичного воздуха может привести к увеличению потери теплоты от недожога топлива и даже к обрыву факела. Чтобы регулировать подачу воздуха в мельницы при неизменной подаче первичного воздуха в топку, нужно часть этого воздуха подавать в топку помимо горелок. Обычно избыточный запыленный воздух вводится в топку через вертикальные сопла со скоростью не менее 35 м/с [9].

Прямоугольные сопла для сброса запыленного воздуха выполняют двустенными (рис. 11.5) для подачи в зазор между стенками охлаждающего воздуха (часть вторичного воздуха). В топку осуществляется также сброс запыленного воздуха системы аспирации бункера сырого угля через сопла на фронтальной и задней стенках.

В 80-х гг. было предложено подавать в сбросные горелки природный газ или мазут для уменьшения потерь от неполного сгорания сбросной угольной пыли. Такое решение оказалось эффективным при работе котла ТПП-210 А на АШ, значение КПД брутто котла увеличилось на 1 %. При эксплуатации такой схемы необходимо контролировать непрерывность поступления запыленного воздуха и отключать подачу топлива при отключении воздуха [10].

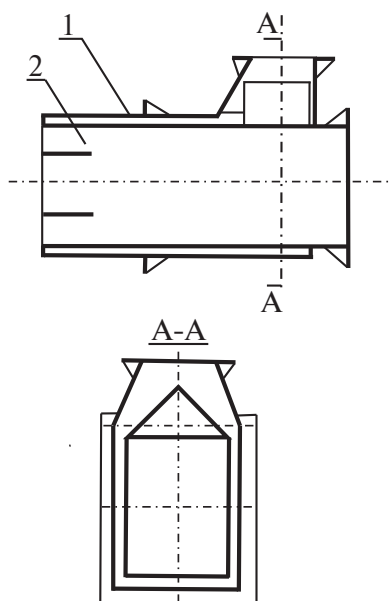


Рис. 11.5. Сопло для сброса в топку запыленного воздуха:

1 — канал вторичного воздуха, 2 — канал запыленного воздуха

### 11.9.2. Организация нижнего дутья

При нижнем дутье ввод значительной части вторичного воздуха (до 30 %) осуществляется непосредственно в топку, минуя горелочные устройства, без сопровождения потоков аэросмеси. Указанная часть горячего воздуха рассредоточивается по всему сечению топочной камеры, затрудняя смешение с аэросмесью, и затягивает формирования пылеугольного факела.

В холодной воронке топки с вертикальным размещением экранных труб ввод струй воздуха осуществляется вдоль ската, при горизонтальной навивке экранных труб организуется нижнее дутье с горизонтальным вводом воздуха вдоль экранных труб через щелевые амбразуры.

Нижнее дутье используется не только как самостоятельное техническое решение, но также как составной компонент аэродинамической вихревой структуры в топке — НТВ, ВИР-технология, при организации ступенчатого сжигания. При этом:

- подача части воздуха в холодную воронку растягивает зону горения вниз и увеличивает тепловую эффективность экранов нижней части топочной камеры за счет увеличения тепловосприятия скатов холодной воронки; это приводит при сохранении номинальной нагрузки к снижению температуры дымовых газов на выходе из топки;

- СНД, растягивая зону горения, снижает уровень температур факела в зоне активного горения, снижает темп шлакования поверхностей нагрева топки и пароперегревателя.

### 11.9.3. Встречное дутье

При фронтальной компоновке горелок во многих случаях предпринимались попытки использования встречного острого дутья для достижения различных целей. Так, для устранения интенсивного шлакования в топке котла ПК-10 (канско-ачинские угли) в 1965 г. были установлены сопла на задней и боковых стенках для подачи горячего воздуха в топку (рис. 11.6) [11].

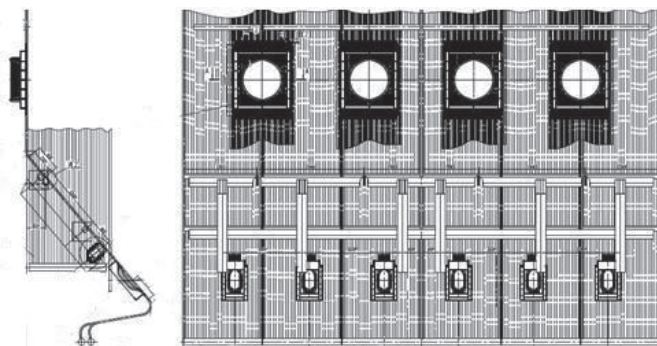


Рис. 11.6. Конструктивная схема размещения сопел нижнего дутья в топке котла БКЗ–420–140–5

Основной задачей выполненной реконструкции с введением острого встречного (третичного) дутья являлось ограничение шлакования путем снижения температуры на выходе из топки. В результате снижена температура газов на выходе из топки на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для встречного дутья использовался горячий воздух после воздухоподогревателя  $305\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  в количестве до 12 % общего расхода воздуха в топку (рис. 11.7).

Поток встречного воздуха выполняет различные функции — он организует воздушную завесу у задней и примыкающей к ней участков боковых стенок, смещая группу факелов к оси топки, способствует турбулизации и интенсификации смешения потоков газа и выгорания топлива.

За счет ограничения загрязнения поверхностей нагрева улучшается тепловосприятие заднего и боковых экранов, снижается температура на выходе из топки.

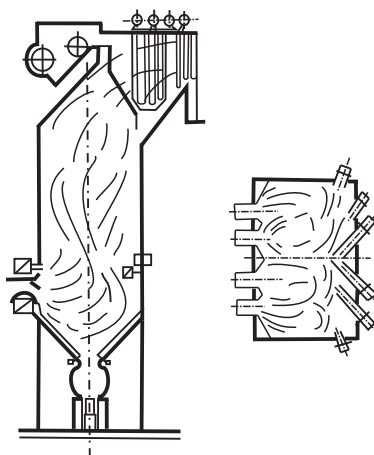


Рис. 11.7. Схема установки сопел встречного (третичного) дутья

### 11.9.4. Защитные воздушные завесы

В ряде случаев определенная часть воздуха (не более 8–10 %) подается в топку для организации защиты поверхностей нагрева от непосредственного контакта с факелом. Для исключения наброса факела на примыкающую стенку непосредственно вдоль этой стенки вводится экранирующая струя горячего воздуха. В случае шлакования экранных поверхностей вокруг горелки используется веерное воздушное экранирование этой зоны, с подачей воздуха по радиусу из горелки.

Экранирующие функции может выполнять и основной воздух (вторичный), как это имеет место в режиме концентрического сжигания.

### 11.9.5. Горячий воздух из системы охлаждения шлака при сухом конвейерном его отводе из топки

Холодная воронка и шлакоотводящее устье могут быть не только источником присосов наружного холодного воздуха. Через них, исключив присосы, можно осуществлять подвод горячего воздуха, возвращающего в топку физическое тепло шлака при выводе его из топки ленточным механизмом (рис. 11.8).

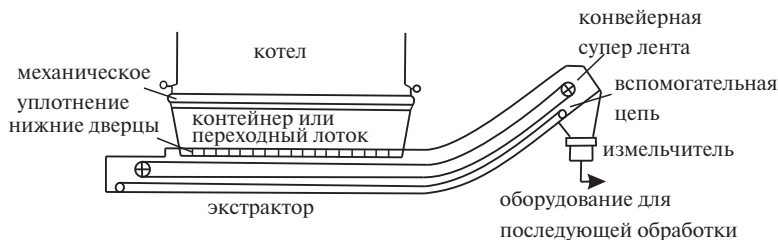


Рис. 11.8. Установка ленточная для сухого вывода шлака из топки с продувкой воздухом

Здесь через конвейерную ленту, набранную из отдельных металлических пластин, снизу продувается холодный воздух, обеспечивающий охлаждение шлака и раскаленной ленты. Нагретый воздух переносит теплоту в топку через укороченную холодную воронку [12].

Таким образом, эта технология вносит определенные изменения в распределение воздушных и тепловых потоков в топочной камере. Эта перспективная система механизации, сокращающая потребление воды и повышающая степень использования потенциального тепла угля в котле, не получила, однако, применения в отечественной энергетике.

### 11.9.6. Плотность топочной камеры и ее обеспечение

#### 1) Неорганизованные поступления холодного воздуха в топку (присосы)

В работающую под небольшим разрежением топочную камеру наружный воздух проникает через неплотности в месте примыкания горелок к корпусу топки, в проходах через обмуровку нижних концов экранных труб, через неплотности водяного затвора, различные лючки, через холодную воронку или шлаковывпускную шахту, места прохода труб через обмуровку, сопряжение стен топки и газохода, а также лючки, лазы, гляделки и обдувочные аппараты. Правилами эксплуатации ТЭС установлены нормы присосов в процентах от теоретически необходимого количества воздуха для номинальной нагрузки котлов. Присосы воздуха в топку и в газовый тракт для паровых пылеугольных котлов паропроизводительностью до 420 т/ч должны быть не более 8 %, для котлов паропроизводительностью выше 420 т/ч — 5 %, для газомазутных котлов — соответственно 5 и 3 %. Топки с цельносварными экранами являются газоплотными. Присосы в топку и газовый тракт водогрейных пылеугольных котлов (без учета золоулавливающих установок) должны быть не более 10 %, газомазутных — не более 5 %.

Согласно механизму, представленному в [13], внутри топки этот воздух, как более холодный, опускается в нижнюю часть топочного объема и создает там слой, препятствующий движению газов и ухудшающий условия зажигания угля (рис. 11.9). Еще опаснее присосы наружного воздуха вблизи горелок, так как при этом охлаждается зона зажигания топлива. Можно указать много примеров того, как после ликвидации присоса наружного воздуха горение топлива становилось более устойчивым, пульсация факела прекращалась и при сниженной нагрузке котла можно было устойчиво работать без подсвечивания мазутом.

Присосы наружного воздуха в пылеприготовительную установку вредны не только тем, что могут повлечь угрубление помола угольной пыли. Их вредное действие сказывается и на топочном режиме. Перед мельницей и в самой мельнице происходит сушка топлива горячим воздухом. Наружный воздух, поступающий в результате присосов, участия в сушке угля не принимает, и уменьшать из-за него подачу горячего воздуха нельзя. Поэтому возрастание присоса наружного



воздуха приводит обычно к повышению скорости входа в топку первичного воздуха, из-за чего увеличивается недожог топлива, удлиняется факел и возрастает опасность его обрыва.

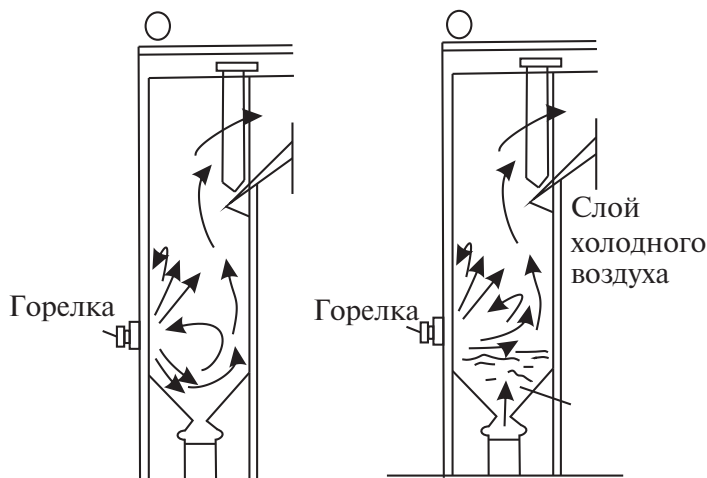


Рис. 11.9. Характер вредного влияния присоса наружного воздуха в нижнюю часть топки на работу вихревых пылеугольных горелок:

- а* — правильное движение газов, при котором большое их количество возвращается к горелкам для воспламенения угольной пыли;
- б* — движение газов при наличии внизу топки слоя холодного воздуха

Недостаточная плотность котла часто является одной из главных причин его низкой надежности и экономичности. Расчеты показывают, что увеличение присосов в топку на 20 % снижает КПД котла более чем на 1 %. Присосы в топочную камеру холодного воздуха, уменьшая количество воздуха, организованно подаваемого в горелки, ухудшают условия воспламенения и сгорания топлива, увеличивая при этом потери теплоты от механической неполноты сгорания. Подсос холодного воздуха в нижнюю часть топки ухудшает условия для выхода жидкого шлака. Местные присосы в различных частях топочной камеры могут явиться причиной усиленного шлакования. Неплотности в топке и газоходах могут быть результатом неудачной конструкции отдельных узлов, неудовлетворительного изготовления и монтажа оборудования, некачественного ремонта и упущений в эксплуатации.

## *2) Утечки газов через неплотности в топке*

Плотность топки и газоходов еще более важно поддерживать на котлах, работающих под наддувом и имеющих цельносварные экраны. Утечки газов через неплотности котла с наддувом могут привести к недопустимой загазованности котельного отделения. Неплотности могут возникать в сочленениях газоплотных панелей, местах прохода труб через панели, лючках и лазах. Для исключения утечки газа в местах выхода труб к коллекторам у котлов под наддувом выполняется так называемый «теплый ящик», куда подается воздух под давлением (от коробов горячего воздуха к горелкам), несколько превышающим давление внутри газохода котла. Перед вводом в эксплуатацию вновь смонтированного котла и после окончания ремонта котла проверяют на плотность топочную камеру. Для предотвращения проникновения газов в теплый ящик на котле П-57, например, предусматривается установка перфорированных коробов из стали Х23 Н18 с заполнением межтрубного пространства в коробе известково-кремнеземистым материалом.

## *3) Основные методы ограничения присосов в топку*

*Уплотнение топки путем обшива металлическим листом.* На рис. 11.10, 11.11 представлена конструкция систем уплотнения котла БКЗ-160, включая экраны боковые, потолочные и холодной воронки.

На боковых поверхностях топки выполняется сплошная обшивка листом непосредственно по экранным трубам диаметром 60×4 мм. Поперек экранных труб к опорным поясам привариваются несущие швеллеры, к которым привариваются листы обшивы толщиной 2 мм. С помощью штырей листы притягиваются профилированными шайбами к трубам. На металлическую обшиву наносится асбоперлитовое напыление толщиной 90 мм. Далее укладывается армирующая сетка (приваривается к штырям), на которую наносится второй слой асбоперлитового напыления до общей высоты слоя асбоперлита 160 мм. Поверх укладывается сетка с газоплотной штукатуркой. Законченный вид теплозащитному ограждению придает газоплотное покрытие на основе поливинилацетатной дисперсии, которое герметизирует обмуровку и сводит до минимума присосы в местах сопряжения элементов.

Уплотнение стыков обшивы скатов холодной воронки и боковых экранов достигается за счет приварки компенсаторов сплошным швом.

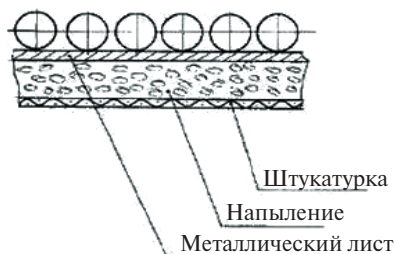


Рис. 11.10. Уплотненная обмуровка экранов

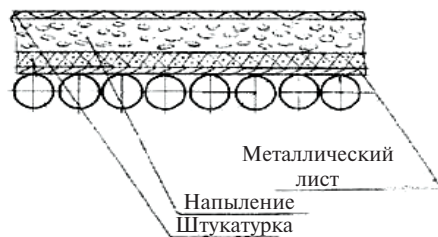


Рис. 11.11. Уплотненная обмуровка потолка топки

В котле П-57 стык экранных труб НРЧ и СРЧ закрывается шамотным кирпичом и двумя слоями известково-кремнеземистых плит. Между обмурованными коллекторами (выходные НРЧ и входные СРЧ) выполняется зазор 270—290 мм для теплового расширения экранов.

*Уплотнение стыка корпуса горелки и металлической обшивки корпуса топки*

Одной из самых сложных проблем в уплотнении топочной камеры является обеспечение плотности стыка корпусов горелки и топки. Это связано со значительным смещением амбразуры горелки при тепловом расширении конструкции топки.

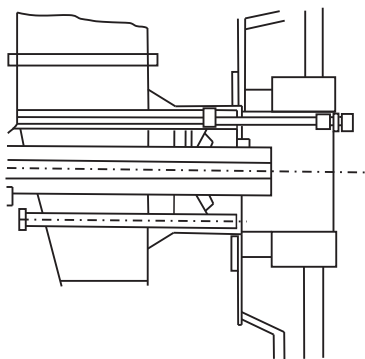


Рис. 11.12. Установка горелки в корпусе котла БКЗ-160—100 ГМ

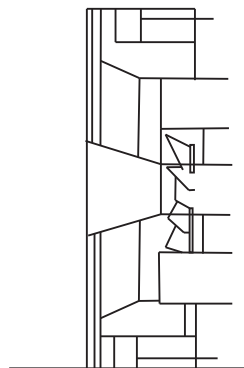


Рис. 11.13. Установка горелки в корпусе котла П-57 блока 500 МВт

Наиболее простым решением является жесткое крепление корпуса горелки к металлической обшиве (рис. 11.12) или каркасу (рис. 11.13) электросваркой. Во втором случае (как в большинстве случаев) кор-

пус горелки входит в амбразуру, что обеспечивает соосность амбразуры и горелки в ходе эксплуатации. Однако в условиях несовпадения термических расширений экранов с натрубной обмуровкой и положения оси горелки необходимо обеспечивать возможность относительного смещения этих конструктивных элементов.

На котле ПК-33 (рис. 11.14) корпус горелки жестко не связан с обмуровкой, он прижимается к ней через металлическую рамку, в пределах которой горелка может смещаться по вертикали. Стабилизация корпуса горелки обеспечивается пружинными фиксаторами. В предыдущей конструкции плотность стыка горелки и топки должен был обеспечивать сильфонный патрубок, допускающий смещение горелки по вертикали и горизонтали.

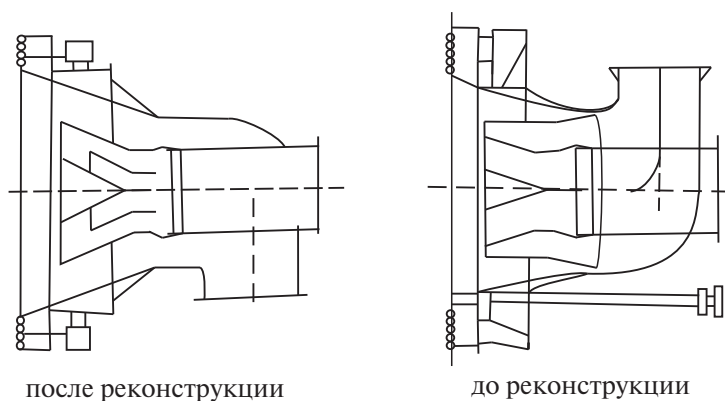


Рис. 11.14. Установка горелки в корпусе котла ПК-33

Рассмотренные способы установки горелок обеспечивают плотность примыкания горелки к стенке топки и предотвращают присос наружного воздуха [14].

### **11.10. Аэродинамические проблемы организации трехступенчатого сжигания**

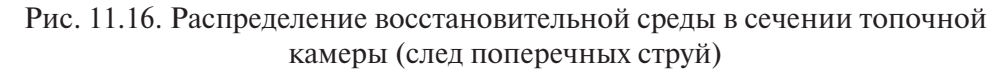
Для эффективного функционирования системы трехступенчатого сжигания необходимо решение ряда аэродинамических задач взаимодействия поперечных струй различного характера (воздух на дожигание, переобогащенный пылегазовый поток) со сносящим потоком топочных газов. Одна из них — *равномерное распределение в сечении*

*топочной камеры восстановительной среды и дожигательного воздуха, наиболее полное перемешивание их с восходящим потоком дымовых газов на возможно более коротком участке.*

В системах трехступенчатого сжигания ввод сред в восстановительную и дожигательную зоны организуется в виде ряда поперечных потоков (струй), вводимых с одной стенки топочной камеры либо встречно. Экологическая (выход оксидов азота) и экономическая (полнота выгорания) эффективность трехступенчатого сжигания определяется в решающей мере тем, насколько удастся решить аэродинамическую задачу — равномерного распределения струй в поперечном потоке и интенсивного размывания их. Специфичность условий решения такой задачи применительно к топочным процессам в современных котлоагрегатах связана, прежде всего, с большими размерами топки — здесь глубина поперечного потока дымовых газов (расстояние от стенки до оси) достигает 10 м, ширина по фронту — до 20 м. При этом конструктивные особенности экранных поверхностей нагрева ограничивают число вводов.

Решение этой задачи осложняется необходимостью значительной дальнобойности этих струй, равномерного их рассредоточения в поперечном сечении топки огромного размера при ограниченном числе вводов. Разработана аэродинамическая схема организации ступенчатого сжигания (рис. 11.15), предусматривающая ввод в топку восстановительной и дожигательной сред в виде системы прямоточных и закрученных струй — чередующихся либо совмещенных (центральная прямоточная и периферийная закрученная струи). При этом учитывается повышенная дальнобойность прямоточной струи, интенсивная размываемость закрученной струи в сносящем потоке топочных газов. Прямоточные струи осуществляют заполнение центральной части топки, закрученные струи развиваются в периферийной и пристенной областях потока (рис. 11.16). Таким образом, оптимальное решение аэродинамической задачи взаимодействия топочных газов и поперечных струй системы трехступенчатого сжигания придает топке значимые экологические качества.

В разработках ЗАО «СибКОТЭС» распределение восстановительной среды по сечению топочной камеры достигается формированием ряда концентрических вихревых потоков этой среды путем различного начального направления угла ввода среды к оси топки. Оси направлены по касательным к окружностям разного диаметра. Такая схема реализована практически впервые в заводском исполнении на котле ТПЕ-214 ТКЗ «Красный котельщик» (рис. 11.17).



Сочетание фронтального расположения основных горелок на противоположных стенках топочной камеры, осуществляющих линейное развитие факелов в параллельных плоскостях, и прямоточных струй восстановительной среды (а также вводимой выше дожигательной среды — части вторичного воздуха) может приводить к несовпадающему распределению в сечении топки поперечно вводимых факелов, восходящих потоков топочных газов и тангенциально подаваемых восстановительной и дожигательной сред

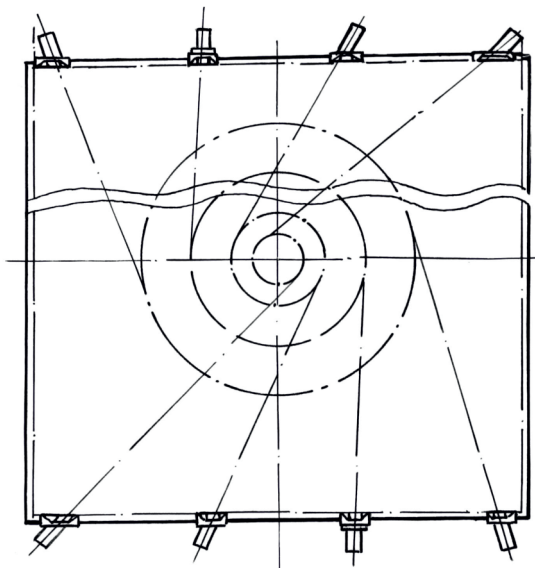


Рис. 11.17. Схема расположения вводов восстановительной ступени котла ТПЕ-214

### **11.11. Забор дымовых газов из топки на пылесистему**

Для сушки топлива дымовыми газами или смесью дымовых газов и воздуха осуществляется отбор дымовых газов (в зависимости от начальной влажности топлива) из топки или за пароперегревателем. При сушке топлива с высокой начальной влажностью отбор дымовых газов осуществляется из топки в зоне температур 900–1100 °С, для сушки шлакующих топлив с умеренной влажностью дымовые газы отбирают из газохода котельной установки в верхней поворотной камере. Отбор дымовых газов из топки по сравнению с отбо-



ром из газохода котла позволяет уменьшить длину газопровода, расход на него материалов, снизить аэродинамическое сопротивление и присос холодного воздуха.

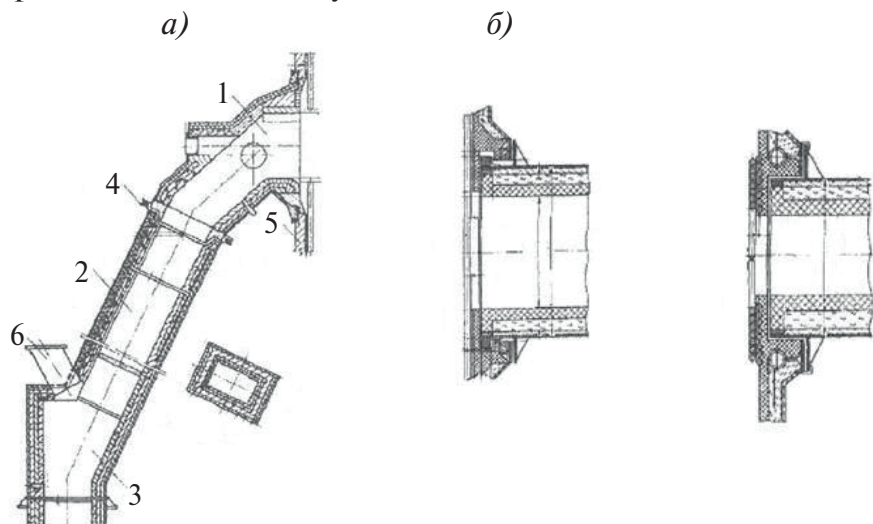


Рис. 11.18. Отбор дымовых газов из топки:

а) газопровод высокотемпературных топочных газов; б) узел примыкания газозаборной шахты к топке; 1 — газозаборное окно, 2 — газопровод к сушке угля, 3 — сушильная шахта, 4 — компенсатор, 5 — стенка топки, 6 — подвод угля;

Окно в верхней части топки необходимо размещать так, чтобы возможность его шлакования была минимальной. Смешение дымовых газов с горячим воздухом осуществляется с помощью системы тангенциально расположенных отверстий (шлиц) в газопроводе вблизи окна. Количество подводимого воздуха определяется на основании теплового расчета, исходя из начальной влажности топлива и допустимого содержания кислорода в пылегазовоздушной смеси на выходе из установки. Максимальная температура смеси дымовых газов и воздуха в целях обеспечения долговечности футеровки газопровода не должна превышать 900 °С.

Газопровод изнутри покрывают огнеупорной футеровкой и многослойной изоляцией, состоящими из легковесного шамотного и диатомового кирпича (толщиной в полкирпича), а также из прослойки листового асбеста и минеральной ваты толщиной 50 мм. Используют и другие теплоизоляционные материалы, например известково-кремнеземистые и совелитовые плиты, бетон на основе муллитокремнезе-

мистого волокна, перлита и др. Снаружи газопровод обшивается металлическим листом, сварные швы и конструкция которого должны обеспечивать его газоплотность. Материалы для футеровки и теплоизоляции выбираются с таким расчетом, чтобы температура наружной металлической обшивки не превышала 55 °С [18].

Скорость газозоудушной среды в газопроводе не должна быть более 15–25 м/с во избежание повышенных сопротивлений и присосов воздуха. Для защиты от высоких температур в последних конструкциях газопроводов используется слой жаростойкого бетона. Наиболее подвержена износу внутренняя футеровка газопровода в местах подачи присадки воздуха и сушильной шахты в зоне контакта с потоком сырого топлива.

В качестве побудителя расхода горячих газов служит разрежение в конечной точке подвода газа либо эжектор, выполняемый в начальном участке газоотборного канала. В таком эжекторе кольцевой периферийный поток воздуха, создавая разрежение по оси канала, подтягивает газы из топки, защищая в то же время стенки канала от прямого контакта с высокотемпературными газами и устанавливая необходимую температуру сушильного агента, разбавляя топочные газы.

Отбор части топочных газов на сушку топлива в системе пылеприготовления не приводит к существенной перестройке аэродинамической структуры топки, но может сказаться на надежности конструкции узлов топки (повреждение газозаборного окна).

---

## Литература к разделу 11

---

1. Шагалова С. Л., Шницер И. Н. Сжигание твердого топлива в топках. Л. : Энергия, 1979.
2. Ромадин В. П. Топки с угловыми тангенциальными горелками // Теплоэнергетика, 1973. № 7.
3. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб. : НПО ЦКТИ-ВТИ, 1996.
4. Гервиц Б., Еловигов А. С., Бисноватый А. С. Реконструкция топочной камеры котлов ПК-33 // Теплоэнергетика. 1971. № 5.
5. Сравнительные исследования топочных камер газомазутных котлов с пережимом и без пережима / Ю. П. Енякин [и др.] // Электрические станции. 1973. № 3.

6. Шатиль А. А. Топочные процессы и устройств. СПб. : Энергия, 1997.
7. Ляховский Д. Н. Турбулентность в прямоточных и закрученных струях // Теория и практика сжигания газа : сб. научных работ. 1964. Вып. II. С. 18–48.
8. Влияние мощности пылеугольных вихревых горелок на протекание топочного процесса / С.Л. Шагалова [и др.] // Теплоэнергетика. 1972. № 8.
9. Мейкляр М. В. Котельные агрегаты ТКЗ сверхкритического давления. М. : Энергия, 1970.
10. Капельсон Л. М., Авдеева И. А., Ларионов В. Ф. Мероприятия по совершенствованию сжигания донецких слабореакционных углей на крупных блочных электростанций. // Эксплуатация и ремонт электростанций. : Экспресс-инф. Сер. 1984. Вып. 12.
11. Применение технологии сухого шлакоудаления / Д. Коппола [и др.] // Экология в энергетике : труды II Международной научно-практической конференции. М. : б. и. 2005. С. 237–241.
12. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. 2003.
13. Жевтяк П. Ф., Уробушкин В. В. Опыт освоения котлов ПК-33 ВСП на Южно-уральской ГРЭС // Электрические станции.
14. Котельные установки энергетических блоков 500–1300 МВт на тепловых электростанциях США. Информэнерго. М. : б. и. 1974.
15. К расчету рециркуляции газов вверх топочной камеры парогенераторов мощных энергоблоков/Ю.Л. Маршак [и др.] // Теплоэнергетика. 1977. № 1–6.
16. Патент РФ 2042880. Способ ступенчатого сжигания топливо-воздушной смеси. 1995.
17. Ю. Г. Назмеев, Г. Р. Мингалеева. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС. М., 2005.

---

## 12. УПРАВЛЕНИЕ ТОПОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ

---

**У**правление топочным процессом имеет целью две основные задачи — направленное изменение процессов, развивающихся в топке, для **регулирования параметров топочного режима с изменением его в заданном диапазоне и стабилизации режима в топке на определенном уровне [1].**

Такое воздействие на топочный режим может осуществляться оператором в ходе эксплуатации, когда условия нормального хода топочного процесса нарушаются рядом побочных обстоятельств. Такое **оперативное регулирование** осуществляется по мере возникновения отклонений от расчетного режима. Речь идет о процессах, которые изменяют условия теплообмена в топке, надежность поверхностей нагрева, условия эвакуации шлака, образования оксидов азота, выгорания топлива, температурный режим поверхностей нагрева. Необходимость такого воздействия связана с нестабильностью качества топлива, неплановым изменением состава оборудования (отключение ряда механизмов, теплообменников), нарастанием процесса шлакования. **Наладочное регулирование** направлено на устранение систематических отклонений от расчетного режима топки и заключается в уточнении расчетного режима эксплуатации котла с корректировкой режимной карты, проведением отдельных реконструктивных работ. Такое регулирование осуществляется специализированными службами в ходе плановых ремонтов.

## **12.1. Объекты воздействия и инструменты, используемые оператором при регулировании топочного процесса**

Основными объектами направленного оперативного воздействия при регулировании топочного режима являются следующие параметры топочного процесса:

- перегрев острого и вторичного пара (температура пара, работа системы впрыска);
- сепарация пыли из основного пылеугольного факела;
- шлакование и загрязнение поверхностей нагрева;
- содержание горючих в летучей золе;
- выделение вредных веществ при горении (оксиды азота, триоксид серы, оксид углерода).

Информация об отклонениях топочного режима от расчетных показателей поступает частично по штатным приборам, системам сигнализации, частично по наблюдениям персонала (машиниста котла, старшего машиниста котла), результатам анализа дымовых газов, очаговых остатков. Задачей оператора является рациональное использование соответствующих технических средств для целенаправленного воздействия на отдельные процессы, развивающиеся в топке. Набор таких средств оперативного управления топочными процессами и их регулирования достаточно широк:

- поддержание расчетного (по режимной карте) общего избытка воздуха в топке) либо оправданного отклонения до стабилизации режима на приемлемом уровне;
- перераспределение воздуха и топлива между ярусами горелок либо отдельными группами горелок;
- отключение отдельных горелок, групп горелок, ярусов горелок;
- подсветка основного пылеугольного факела высокореакционным топливом (природный газ, мазут);
- изменение положения поворотных горелок;
- изменение положения факела плоскофакельных горелок изменением соотношения расходов встречных плоских струй;
- подача рециркулирующих инертных (дымовых газов) газов в топку, регулирование их расхода;
- изменение качества помола угля (загрубление или утонение).

По мере развития топочной техники и оборудования расширяются как задачи регулирования, так и инструменты воздействия на технологические процессы в топочной камере. Наряду с оперативным вмешательством эксплуатационного персонала в топочные процессы для корректировки их существенную роль играет режимная наладка работы котла, проводимая с оценкой не только достигаемого эффекта, но также с выявлением всех побочных последствий изменения режима. Эти работы могут выполняться в ходе эксплуатации котла, а также по завершению ремонта котла. В этом случае объем возможных режимных и реконструктивных работ весьма обширен — от уточнения скоростного режима горелок, изменения крутки потоков в горелке до масштабных реконструктивных работ.

Мы ограничимся рассмотрением способов регулирования и стабилизации следующих основных параметров топочного процесса:

- регулирование интенсивности шлакования и обеспечение бесшлаковочного режима работы топки;
- расчетная температура на выходе из топки для поддержания перегрева пара;
- полнота сгорания топлива;
- ограничение высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева;
- ограничение образования вредных веществ (за счет использования таких режимных факторов, как положение факела в топке и регулирование температурного уровня топочного процесса вводом газов рециркуляции);
- стабильность эвакуации шлака из топки, а также регулярная очистка поверхностей нагрева от настенных отложений.

## **12.2. Рециркуляция дымовых газов как инструмент регулирования топочного процесса**

---

### **12.2.1. Сфера применения газовой рециркуляции**

Парадоксальное на первый взгляд техническое решение — подавать в топку дымовые газы для регулирования топочных процессов — достаточно давно используется на практике. Со временем цели его трансформируются, сфера приложения расширяется, при этом все

в большей мере использование его носит комплексный характер. Ввод дымовых газов в топку используется для решения целого ряда технологических и экологических задач:

- **снижение температуры газов на выходе из топки при высоких нагрузках** путем **присадки дымовых газов в верхнюю часть топки** до уровня требуемого по условиям предотвращения загрязнения конвективных поверхностей нагрева, а также для лучшего распределения газов по сечению топки. Ввод газов рециркуляции в верхнюю часть топки уменьшает также тепловосприятие ширм, позволяет облегчить температурные условия работы труб ширм, увеличивая перегрев пара в последующих участках пароперегревателя. В отечественной практике рециркуляция в верхнюю часть топки (вихревой, прямоточной) используется, прежде всего, как один из способов обеспечения бесшлаковой эксплуатации, поддержания расчетной температуры продуктов сгорания на выходе из топки, обеспечения равномерности температуры потока газов по глубине топки;

- **выравнивание профиля температур дымовых газов** на выходе из топки в мощных котлах путем подачи дымовых газов через шлицы в верхней части топочной камеры;

- **регулирование уровня температуры дымовых газов на выходе из топки** и соответственно температуры перегрева пара **вводом дымовых газов в нижнюю часть топки**. При пониженных нагрузках рециркуляция дымовых газов в нижнюю часть топки (через холодную воронку) используется также для регулирования температуры промежуточного перегрева пара и одновременно для уменьшения тепловосприятия в топке с целью снижения температуры стенок труб экранов;

- **снижение максимальной тепловой нагрузки экранов НРЧ** осуществляется рециркуляцией дымовых газов в нижнюю часть топки различными путями (через горелки, непосредственно в нижнюю часть топки через систему сопел);

- **предотвращение образования «воздушных» оксидов азота** достигается снижением температурного уровня топочного процесса вводом дымовых газов непосредственно в топку в нижней ее части либо через горелки;

- **предотвращение образования «топливных» оксидов азота** вводом рециркулирующих дымовых газов через горелки в качестве изолирующей среды, разделяющей потоки аэросмеси и вторичного воздуха, а также путем разбавления воздуха нейтральной средой и снижения концентрации окислителя в факеле;



- **транспортировка и распределение в сечении топки вспомогательного топлива** при формировании восстановительной зоны системы трехступенчатого сжигания;
- **регулирование температуры сушильного агента**, используемого для сушки высоковлажных либо высокореакционных топлив, присадкой дымовых газов (450–1000 °С) к сушильному агенту;
- **предотвращение сепарации недогоревшей и невоспламенившейся угольной пыли** вводом рециркулирующих дымовых газов через холодную воронку.

Рециркуляцию дымовых газов используют также для одновременного решения ряда задач. Так, ввод рециркулирующих газов в холодную воронку позволил на котле типа ПК-14 предотвратить значительную сепарацию недогоревших угольных частиц при снижении выхода оксидов азота на 15–17 %.

Метод рециркуляции дымовых газов остается актуальным, он находит новые сферы приложения в системах сжигания энергетического топлива. В новейших разработках камер сгорания ГТУ с температурой газов до 1700 °С рециркуляция отработанных газов осуществляется для уменьшения образования воздушных оксидов азота.

Таким образом, целенаправленность использования рециркулирующих газов в конкретных топочных устройствах для реализации тех или иных рассмотренных механизмов воздействия на топочный процесс определяет соответствующее специфическое конструктивное решение и эффективность системы рециркуляции в целом. Организация ввода рециркулирующих газов в топку непосредственно в топочную камеру и через горелки (в смеси с воздухом или по отдельному каналу) до последнего времени существенно трансформировалась не только применительно к новым задачам, но также с расширением представлений о механизме воздействия рециркулирующих газов. Этот способ остается универсальным эффективным способом корректировки топочного режима как в газомазутных, так и пылеугольных котлах.

Таким образом, рециркуляция дымовых газов в топку принципиально меняет не только аэродинамическую структуру топочного объема, внося новые процессы в турбулентный крупномасштабный массообмен, но также и изменяет состав топочных газов, существенно увеличивает их количество.

Применение рециркуляции дымовых газов в топку связано со снижением КПД котла в среднем на 0,03–0,06 % на каждый 1 % кратности рециркуляции.

### **12.2.2. Выравнивание температуры дымовых газов на выходе из топки**

Для крупных топок актуальной проблемой является температурная неравномерность дымовых газов на выходе из топки. Для решения этой задачи на выходе из топки выполняется ряд сбросных шлицев для ввода дымовых газов. Подача газов рециркуляции в верхнюю часть топки котла путем поперечного ввода их в поток продуктов сгорания рассредоточенными струями через отдельные шлицы позволяет путем перераспределения потока рециркулирующих газов между шлицами устранять неравномерность температурного профиля по ширине топки. Такие устройства используются в прямоточных пылеугольных котлах зарубежных фирм. В топке котла ТПП-804, рассчитанного на сжигание угля, выполнены на выходе из топки на отметке 52,2 м на фронтальной и задней стенках топки сопла для ввода рециркулирующих дымовых газов (рис. 12.1, 12.2). С помощью индивидуальных поворотных шиберов на подводе газа к каждой шлице обеспечивается возможность оптимального распределения рециркулирующих газов по ширине топки и выравнивание температуры топочных газов. Это позволяет предупредить шлакование пароперегревателя, обеспечив возможность выравнивания температурного поля топочных газов на выходе из топки. Расчетный расход газов рециркуляции вверх топки составляет 15–20 % от общего количества газов рециркуляции, поступающих в топку.

### **12.2.3. Газовое регулирование температуры перегретого пара**

Ввод газов рециркуляции в **верхнюю часть топки** ведет к снижению температуры газов на выходе из топки. Объем дымовых газов и их скорость при этом возрастают. Соответственно, уменьшается тепловосприятие ширм и увеличивается тепловосприятие в последующих поверхностях перегревателя. В итоге обеспечивается повышение температуры перегрева пара. Ввод рециркуляции газов в верхнюю часть топки позволяет изменять температурные условия работы труб ширм. При высоких нагрузках используется присадка дымовых газов в верхнюю часть топки для снижения температуры газов на выходе из нее до уровня, требуемого по условиям предотвращения загрязнения конвективных поверхностей нагрева, а также для лучшего распределения газов по сечению топки.

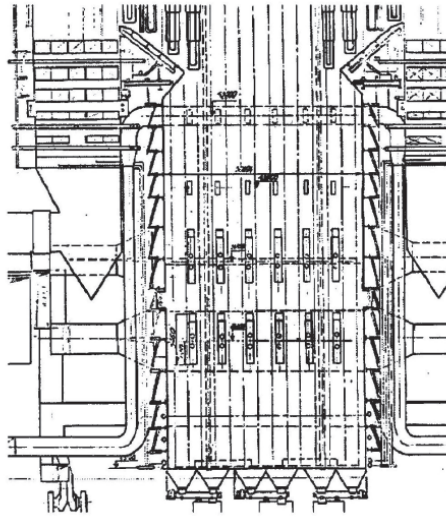


Рис. 12.1. Выполнение шлицев для ввода рециркулирующих газов в верхнюю часть топки (отметка 52.2 м) котла ТПП-804 блока 800 МВт (кузнечный уголь)

Среди известных методов газового регулирования температуры перегретого пара заметное распространение получило использование газов рециркуляции, вводимых **в нижнюю часть топки** через холодную воронку. Это позволяет при пониженных нагрузках регулировать температуру промежуточного перегрева пара и одновременно уменьшить тепловосприятие в топке с целью снижения температуры стенок труб экранов. Особенность этого метода заключается в том, что рециркуляция газов не приводит к росту температуры топочных газов на выходе из топки за счет снижения температуры в объеме топки и уменьшения теплоотдачи к экранам. В то же время, с увеличением скорости дымовых газов, разбавленных рециркулирующими газами, увеличивается тепловосприятие конвективных поверхностей. Интерес к этому способу связан с таким достоинством, как меньшие потери с уходящими газами (поскольку с подачей дымовых газов в систему рециркуляции не изменяется объем уходящих газов и потери  $q_2$ ). Однако для функционирования такой системы в пылеугольных котлах требуется дымосос рециркуляции ДРГ, а также промежуточный золоуловитель. Имеются и другие ограничения в использовании рециркуляции с нижним вводом дымовых газов — затруднено ее использование при сжигании тощих, высокозольных углей. Как отмечают опытные специалисты, рециркуляция с нижним вводом является лучшим способом регулирования температуры пара промежуточного перегрева для газомазутных котлов при пониженных нагрузках.

Использование газовой рециркуляции в нижней части топки через горелки газомазутного котла для снижения уровня тепловых потоков при  $r = 0,15$  снижает тепловосприятие экранов в зоне максимального тепловыделения на 20–25 %. При этом отмечается снижение температуры в корне факела без заметного ухудшения итоговых характеристик выгорания топлива ( $r = 0,30–0,35$ ).

Эффективность осуществления этих функций при непосредственном вводе газов в сносящий поток топочных газов определяется интенсивностью перемешивания с потоком топочных газов. Она оценивается, прежде всего, дальнобойностью струй — глубиной их проникновения в сносящий поток топочных газов, а также распределением газов во всем потоке, то есть общей аэродинамической картиной топочного объема. Для этого используется двусторонний ввод газов рециркуляции через ряд сопел. Коэффициент рециркуляции газов для регулирования средней температуры на выходе из топки и выравнивания ее по сечению потока может достигать 0,45–0,5.

Ввод газов рециркуляции может осуществляться и на уровне горелочного пояса через дополнительные каналы горелок либо в смешении с горячим воздухом (рис. 12.3).

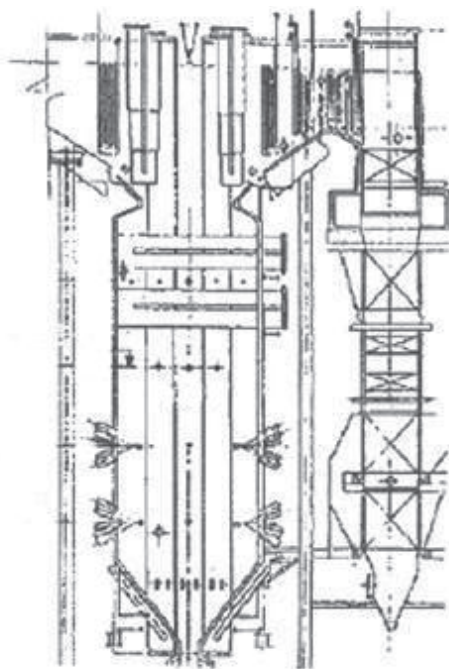


Рис. 12.2. Конструктивная схема котла ТПП-804 с верхним вводом газов рециркуляции (блок 800 МВт, Пермская ГРЭС)

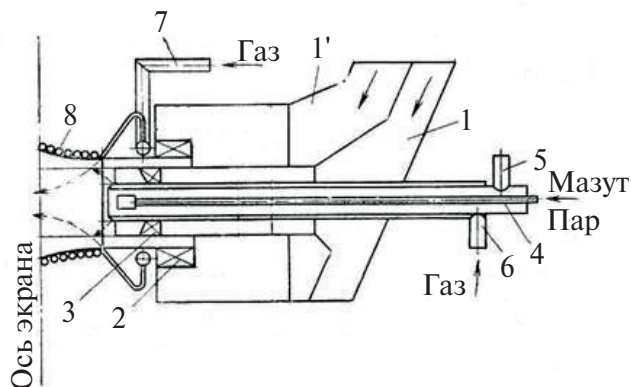


Рис. 12.3. Газомазутная горелка котла ТГМП-324 с периферийным вводом газов рециркуляции:

- 1 — короб внутреннего потока воздуха; 1' — короб периферийного потока воздуха;  
 2 — тангенциальный лопаточный завихритель периферийного потока воздуха;  
 3 — аксиальный лопаточный завихритель внутреннего потока вторичного воздуха;  
 4 — форсунка; 5 — «мазутный» воздух; 6 — подвод газа внутренний; 7 — подвод газа наружный с кольцевым раздающим коллектором; 8 — выходной конус горелки

Разработана методика расчета этих параметров применительно к прямоточным и вихревым потокам топочных газов [2].

#### 12.2.4. Ограничение процесса окисления азота воздуха

Подавление «воздушных» оксидов азота осуществляется снижением температурного уровня процесса в топке вводом инертных дымовых газов в нижнюю часть топки. Ограничение выхода «топливных» оксидов достигается принудительным вводом в факел дымовых газов рециркуляции — в качестве балластирующей и разделительной промежуточной сред, замедляющих процесс смешения вторичного воздуха с топливом.

Целенаправленной избирательной реализации каждого из этих механизмов соответствует специфическое конструктивное решение. В первом случае — автономный ввод рециркулирующих дымовых газов через горелку в рассечку между двумя потоками воздуха («экранный» ввод), во втором — предварительное смешение воздуха и газов рециркуляции, третьему варианту соответствует ввод дымовых газов в топку по отдельному каналу помимо горелок либо по периферийному каналу.

Для подавления образования «топливных» оксидов азота в пылеугольных котлах используется замедление смесеобразования и перевод связанного азота топлива в нейтральный молекулярный азот с помощью дымовых газов рециркуляции. Для этого применяются различные конструктивные решения:

- автономный ввод рециркулирующих дымовых газов через горелку в рассечку между двумя потоками воздуха (замедление смесеобразования);
- предварительное смешение воздуха и газов рециркуляции (уменьшение концентрации окислителя);
- ввод дымовых газов в топку по отдельному каналу помимо горелок либо по периферийному каналу;
- уменьшение радиальной неравномерности концентрационных и температурных полей в начальном участке факела (характерной для вихревых горелок) с соответствующим снижением локальных максимальных температур;
- воздействие на условия начального воспламенения при принудительном подводе рециркулирующих газов по оси горелки (по центральному каналу непосредственно в приосевую зону обратных токов, осуществляющих стабилизацию горения); следствием такой системы рециркуляции является охлаждение рециркулирующих высокотемпературных продуктов горения, смещение зоны обратных токов от горелки и, в итоге, затягивание горения.

Эти технологические приемы широко используются на практике:

*Котел ТГМП-1202 Костромской ГРЭС*, блок 1200 МВт на природном газе.

Средний коэффициент избытка воздуха на выходе из топки в рабочем диапазоне нагрузок составляет 1,02–1,03. Рециркуляция дымовых газов с вводом их в топку через горелки позволяет снижать выход оксидов азота на 50 % (до 600–800 мг/м<sup>3</sup>) — степень рециркуляции до 16 % (ограничение из-за чрезмерного роста температуры промперегрева).

*Котел ТГМП-114, ТГМП-314 Ириклинской ГРЭС*, работа на природном газе.

При степени рециркуляции  $r = 16\text{--}20\%$  (равнозначный эффект при вводе рециркулирующих газов в воздушное дутье и в периферийный кольцевой канал горелки) достигается двукратное снижение выбросов оксидов азота. Каждый 1 % рециркулирующих газов соответству-



ет снижению выхода  $\text{NO}_x$  на 1,5 % для котла ТГМП-114 и 2,4–2,5 % для котла ТГМП-314.

*Котел ДКВР-20, сжигание природного газа.*

Организована рециркуляция дымовых газов по упрощенной схеме — газозабор за дымососом соединен с воздухозаборной трубой вентилятора дутья ( $r = 15\text{--}20\%$ ) — концентрация оксидов азота в дымовых газах снижается с  $0,14 \text{ г/м}^3$  до  $0,07 \text{ г/м}^3$  ( $D = 0,75 D_{\text{ном}}$ ;  $\alpha = 1,1$ ).

*Котел ПК-19 Краснодарской ТЭЦ.*

Организован ввод дымовых газов в рассечку между двумя концентричными потоками вторичного воздуха. Внешний поток воздуха составляет до 55 % общего расхода. Снижен выброс оксидов азота на 50 %.

*Котел ТГМП-314 Костромской ГРЭС,* использует сернистый мазут с малыми избытками воздуха в вихревых горелках (встречное двухъярусное расположение). Подача газов рециркуляции осуществляется в воздухопроводы горячего воздуха. При  $r = 16\%$   $\Delta C_{\text{NO}_x} = 50\%$ . При снижении нагрузки эффект уменьшается. Не обнаружено заметного влияния рециркуляции на топочные потери и надежность котла.

*Котел ТГМП-314 А Костромской ГРЭС на мазуте.*

Сжигание мазута и природного газа в подовых горелках с вводом рециркулирующих газов по периферии горелок ( $r = 7\text{--}8\%$ ) обеспечивает снижение выбросов оксидов азота на 35 %.

*Котел ТГМП-204 ХЛ блока 800 МВт Сургутской ГРЭС-2 (природный газ).*

Установка рециркуляции дымовых газов многофункциональна: осуществляет регулирование промперегрева, теплового режима экранных поверхностей, ограничение выбросов оксидов азота. Газы рециркуляции отбираются перед РВП и поступают в топку через периферийные каналы горелок, а также через шлицы в верхней части топки. Изменение подачи газов рециркуляции от  $r = 3,0$  до 15 % обеспечивает  $\Delta C_{\text{NO}_x}$  до 50 % (от 1,1 до  $0,5 \text{ г/м}^3$ ). При увеличении ввода рециркулирующих газов  $r > 15\%$  снижение  $C_{\text{NO}_x}$  не отмечено. Подача газов рециркуляции в верхнюю часть топки не влияет на выход оксидов азота ( $\alpha_T = 1,05\text{--}1,07$ ).

Эффективность рециркуляции, достигаемая в реальных условиях, оказывается ниже теоретически возможной по той причине, что при подаче смеси газов с общим воздухом не обеспечивается равномерное распределение вводимых газов по горелкам, а также однородность газозооной смеси рециркулирующих газов и дутьевого воз-



духа. Теоретический анализ проблемы показал, что эффективность рециркуляции дымовых газов может быть достигнута при равномерном распределении рециркулирующих газов по горелкам и максимальной однородности газозвушной смеси (обедненного окислителя). Снижение выхода оксидов азота в этом случае возможно на один-два порядка. Для этого необходимо равномерно распределить рециркулирующие газы в дутьевом воздухе с получением однородной газозвушной смеси [3].

Концентрация  $\text{NO}_x$ , приведенная к  $\text{NO}_2$  и содержанию  $\text{O}_2 = 6\%$ , получаемая при рациональной организации рециркуляции, может быть оценена по следующей формуле:

$$C_r = \left[ (C_o - C_6) K_r + \frac{C_6}{1 + 2_r} \right] (1 + r),$$

где  $C_o$ ,  $C_r$  — концентрации воздушных оксидов при работе без рециркуляции, с рециркуляцией,  $\text{мг/м}^3$ ;

$C_6$  — концентрация «быстрых» оксидов азота,  $\text{мг/м}^3$  [4],

$K_r = (0,1 t_b^{0,2})^{10r}$ ;

$t_b$  — температура дутьевого воздуха (при  $t_b < 50^\circ\text{C}$  принимается  $t_b = 50^\circ\text{C}$ );

$C_6 = 20 \text{ мг/м}^3$  при  $t_b = 50^\circ\text{C}$  и  $30 \text{ мг/м}^3$  при  $t_b > 200^\circ\text{C}$ .

Это положение подтверждено практикой последних лет. На котле ТГМ-96 Б ТЭЦ-8 Мосэнерго подача дымовых газов в смеси с дутьевым воздухом (смешение на всасе дутьевого вентилятора) обеспечивает при  $r = 8-9\%$  двукратное снижение концентрации оксидов азота до  $80-10 \text{ мг/м}^3$ . Ко всем горелкам поступала практически одинаковая по концентрации дымовых газов смесь воздуха и рециркулирующих газов. Использование специальных смесителей рециркулирующих дымовых газов с воздухом позволило снизить выход  $\text{NO}_x$  на котлах КВГМ-180 до  $60-80 \text{ мг/м}^3$ , ТП-170-16 — до  $125 \text{ мг/м}^3$ . Из графика (рис. 12.4) следует, что возможности метода рециркуляции по подавлению оксидов азота практически исчерпываются при  $r = 15...20\%$ . Дальнейшее увеличение степени рециркуляции дымовых газов не приводит к существенному изменению выхода оксидов азота.

Эффективность системы рециркуляции может быть повышена рациональным распределением рециркулирующих газов по ширине топки. При равномерной подаче газов рециркуляции по го-

релкам котла ТГМП-314 А, сжигающего мазут (16 горелок в два яруса на фронтальной и задней стенках топочной камеры) при степени рециркуляции  $r = 15\%$ , снижение выхода оксидов азота соответствует  $\Delta C_{\text{NO}_x} = 520 \text{ мг/м}^3$ , с увеличением подачи газов рециркуляции на центральные горелки, с соответствующим ее уменьшением на крайние (пристенные) горелки  $C_{\text{NO}_x}$  снижена до  $380 \text{ мг/м}^3$  ( $G_{\text{крайн}}/G_{\text{центр}} = 0,2$ ) [3].

Эффективность системы рециркуляции может быть повышена также рациональным распределением рециркулирующих газов по ширине топки. При равномерной подаче газов рециркуляции по горелкам котла ТГМП-314 А, сжигающего мазут (16 горелок в два яруса на фронтальной и задней стенках топочной камеры) при степени рециркуляции  $r = 15\%$ , снижение выхода оксидов азота соответствует  $\Delta C_{\text{NO}_x} = 520 \text{ мг/м}^3$ , с увеличением подачи газов рециркуляции на центральные горелки, с соответствующим ее уменьшением на крайние (пристенные) горелки  $C_{\text{NO}_x}$  снижена до  $380 \text{ мг/м}^3$  ( $G_{\text{крайн}}/G_{\text{центр}} = 0,2$ ) [3].

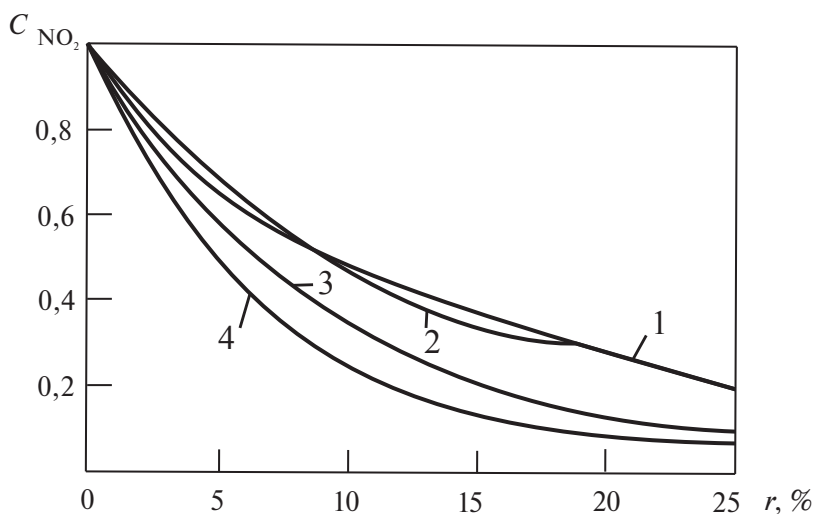


Рис. 12.4. Снижение концентрации оксидов азота в уходящих газах в зависимости от степени рециркуляции при смешении рециркулируемых газов с общим воздухом:

1 — по данным [5]; 2 — по данным [6]; 3, 4 — по данным [2; 3];  
3 — при температуре  $t_b = 300^\circ\text{C}$ ; 4 —  $t_b = 10^\circ\text{C}$

### 12.2.5. Использование рециркулирующих топочных газов для замены конструктивных узлов топки

В ряде пылеугольных котлов газы рециркуляции используются для защиты экранных поверхностей нагрева снижением температуры факела путем ввода дымовых газов в зону активного горения, а также для защиты экранов от наброса факела в топках с фронтальным расположением горелок (поз. 1, рис. 12.5) путем экранирования задней стенки топки системой струй через ряд сопел (поз. 2, рис. 12.5).

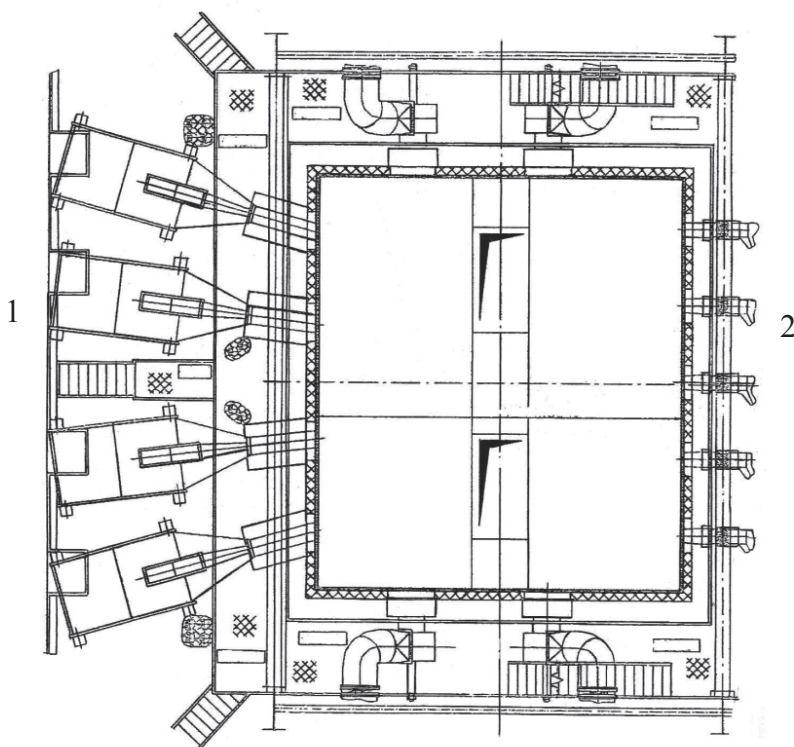


Рис. 12.5. Паровой котел БКЗ 220–100 с системой шлицев ввода рециркулирующих дымовых газов для экранирования задней стенки топочной камеры

## 12.3. Управление процессами шлакования

### 12.3.1. Значимость процессов шлакования в эксплуатации топки

Одним из важнейших показателей эффективности топочного процесса является ограниченная степень шлакования, загрязнения поверхностей нагрева как фактор стабильности режима работы котла [2]. Решение проблем шлакования и загрязнения поверхностей нагрева топочных камер и конвективных газоходов является одной из основных проблем при проектировании и освоении пылеугольных котлов, сжигающих каменные угли, низкосортные бурые угли и лигниты [5].

Эволюция в организации топочного процесса в отечественной энергетике осуществлялась в условиях преодоления не всегда прогнозируемых проблем прогрессирующих и трудноудаляемых натрубных отложений. Надежность работы котлов лимитировалась шлакованием радиационных поверхностей нагрева, образованием сульфатно-кальциевых прочных отложений на радиационно-конвективных и конвективных поверхностях. Эта проблема обострялась по мере вовлечения в топливный баланс новых углей, преимущественно канско-ачинских, со специфическими термофизическими свойствами минеральной части углей, определяющими плавкость золы.

Загрязнение и шлакование в топке котла, так же как и в области конвективного теплообмена, приводит к падению КПД котла и снижению эксплуатационных характеристик [2]. При этом наблюдаются:

- повышение температуры дымовых газов на выходе топки;
- повышение расхода охлаждающей среды пароохладителя;
- повышение температуры уходящих дымовых газов котла;
- повреждения поверхностей нагрева в области холодной воронки и системы сухого/влажного золоудаления в результате падения крупных формаций застекловывшегося шлака со стенок топки и/или пароперегревателя;
- незапланированный останов котла;
- механическая очистка ведет к повреждению труб, что отражается на эксплуатационных характеристиках котла.

### 12.3.2. Оценка механизмов шлакования пылеугольной топки

Для оценки условий образования разных типов и стадийности процессов шлакования принята совокупность показателей свойств топлива:

- температура начала шлакования;
- прочностные свойства шлаковых отложений;
- склонность к образованию прочных селективно обогащенных отложений (железистых, сульфатно-кальциевых);
- склонность к образованию отложений на основе активных щелочей;
- комплексный показатель склонности к шлакованию — потенциал шлакования.

Шлакующие свойства большинства углей зависят от характера соединений, в которых присутствуют основные компоненты, формирующие свойства углей.

1. Железо в наибольшей степени влияет на условия шлакования, присутствуя в углях в виде пирита  $\text{FeS}_2$ . Пирит способствует формированию на поверхностях нагрева прочных железистых отложений и высокой склонности угля к шлакованию топочных экранов.

2. При увеличении общей зольности уголь становится менее шлакующим вследствие:

- снижения температуры горения;
- меньшей прочности первичных отложений;
- роста температуры начала шлакования.

3. Увеличенное содержание щелочных компонентов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) повышает склонность угля к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений, при этом увеличено присутствие  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Эти процессы определяются как температурным уровнем топочного процесса, аэродинамической структурой потоков в топке, равномерностью распределения окислителя в топочном объеме, так и неоднородностью и нестабильностью состава минеральной части угля, прежде всего, бурых углей. Что касается значимости свойств угля в развитии указанных процессов, то наиболее важным является при высоком содержании оксида кальция  $\text{CaO}$  существенное изменение в широких пределах соотношения основных и кислотных оксидов по мере изменения общей зольности топлива.

Общепринято, что процесс шлакования топочных экранов можно представить двумя стадиями. Вначале образуется первичный, медленно растущий слой, а затем быстро растущие вторичные отложения. Способность к саморасшлаковке экранов обусловлена свойствами первичного слоя. Чем прочнее первичный слой, тем труднее саморасшлаковка под действием силы тяжести и ниже эффективность средств очистки поверхностей нагрева.

Предпосылкой возникновения плотных нижних отложений является наличие в летучей золе химически активных компонентов, способных образовывать связанные отложения [6]. Процесс спекания частиц золы в плотные отложения протекает весьма медленно. Частицы золы после осаждения на поверхности в начальных стадиях возникновения отложений связаны между собой и поверхностью труб слабо и удерживаются на месте из-за воздействия межмолекулярных сил и шероховатости поверхности. При более высоких температурах поверхности влияние оказывает процесс спекания слоя отложений. Наивысшей спекаемостью обладают самые тонкие фракции золы — менее 0,5 мкм.

На чистую поверхность парогенерирующих труб с высокой температурой стенки начинают выпадать наиболее мелкие частицы летучей золы. Среди них в большем или меньшем количестве находятся частицы, состоящие в основном из окислов железа. Следующие слои отложений образуются за счет более крупных частиц. Далее процесс образования прочносвязанных с трубой отложений убыстряется вследствие повышения шероховатости поверхности и в результате процесса сульфатизации, в котором одновременно с упрочнением слоя и образованием связанного отложения происходит постепенное увеличение содержания  $SO_3$  [7]. Скорость связывания частиц золы в отложениях зависит от количества способных к сульфатизации компонентов золы, осевших на поверхность нагрева, и, в первую очередь, от количества свободной окиси кальция.

Со временем температура наружной поверхности плотных нижних отложений с ростом их толщины непрерывно увеличивается и приближается к температуре продуктов сгорания. С некоторой температуры внешней поверхности этих отложений на них начинают образовываться растущие против потока газов гребневидные отложения. Образование гребневидных отложений наблюдается лишь при температурах частиц, превышающих в момент касания с поверхностью «критическую» величину.

### 12.3.3. Способы направленного воздействия на процессы шлакования

Понимание механизмов шлакования позволяет определить пути управления процессами его развития в топке:

- при эксплуатации (режимные факторы);
- при проектировании;
- при выборе топлива;
- при выборе технологии сжигания.

В анализе условий шлакования существенны такие характеристики этого процесса:

- начало и скорость развития шлаковых отложений;
- прочность сульфатно-кальцевых отложений и спекаемость отложения.

По нашему мнению, необоснованно и некорректно использование в качестве характеристик угля параметра «шлакуемость». При оценке исходных характеристик топлива следует ограничиваться плавкостными показателями минеральной части угля, которая однозначно не предопределяет возможность шлакования в топочной камере. Дело в том, что вероятность и интенсивность шлакования определяется тремя основными факторами:

- характеристикой минеральной части угля;
- конструкцией топки и горелочных устройств;
- режимом работы котла (нагрузка, избыток воздуха, тонкость помола  $R_{90}$ , соотношение первичного и вторичного воздуха, организация топочного процесса, характеристика пристенного газового слоя у топочных экранов — состав слоя топочных газов на расстоянии 0,05–1 м от экранов, температура газов, скорость газов и их направление, содержание кислорода, падающий тепловой поток);
- температурой плавления;
- склонностью к образованию железистых отложений.

#### *1) Режимные факторы воздействия на шлакование*

Оперативное воздействие на шлакование осуществлялось набором различных технологических решений [7; 8]:

- низкие температуры в зоне горения с газовой сушкой и рециркуляцией дымовых газов в топку;
- пониженное тепловое напряжение в топке;
- тангенциальная многоярусная компоновка прямоточных горелок;



– формирование пристенных газовых завес для локальной защиты экранов [4].

Группа режимных мероприятий включает:

- 1) увеличение избытка воздуха;
- 2) заглубление помола топлива;
- 3) увеличение доли третичного воздуха (подаваемого в топку выше горелочного пояса);
- 4) перераспределение топлива по ярусам горелок;
- 5) использование средств очистки от отложений.

### *1. Общий избыток воздуха в топке*

Работа с низкими избытками воздуха (общими или локальными) и соответствующий рост температуры газа служили одной из основных причин шлакования котлов. При этом складываются условия образования прочных первичных (железистых) отложений (рис. 12.6, 12.7). Затягивание выгорания пирита приводит к тому, что продукты его неполного окисления формируют прочные железистые отложения. Повышение избытка воздуха сверх оптимального является доступным и эффективным соседством борьбы со шлакованием. Так, длительная эксплуатация котла П-57 на экибастузском угле с избытком воздуха  $a''_{\text{нп}} < 1,15$  привела со временем к образованию на экранах прочных железистых отложений, что нехарактерно для этого угля.

### *2. Тонкость помола угля*

При углублении помола уменьшается образование и толщина рыхлого первичного слоя, при этом снижается температура газов на выходе из топки. Это явление характерно для экибастузского и кузнецкого углей и используется в ряде случаев для снижения шлакования. Однако для некоторых углей может наблюдаться противоположный эффект.

### *3. Распределение воздуха и топлива по горелкам*

Отмечено значительное, но неоднозначное влияние неравномерности распределения воздуха и топлива по горелкам. Направленная, управляемая неравномерность распределения реагентов по горелкам — один из способов реализации трехступенчатого сжигания. В топке с фронтальным расположением горелок максимальные температуры топочных газов наблюдаются в центральной части потока газов в поворотных газоходах (из-за рассеивания и ослабления лучистого теплового потока частицами летучей золы), которая обслуживается средними горелками. Поэтому разгрузка этих горелок по топливу или увеличению подачи воздуха снижает неравномерность температуры и ослабляет процессы шлакования.

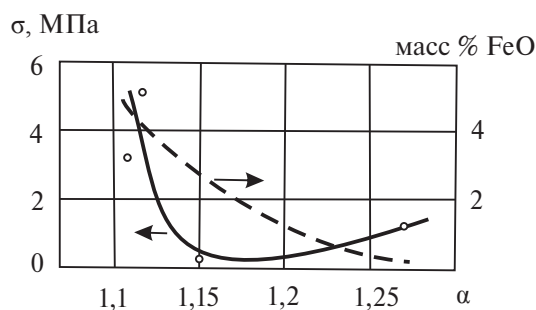


Рис. 12.6. Влияние коэффициента избытка воздуха на прочность вторичных отложений экибастузского угля

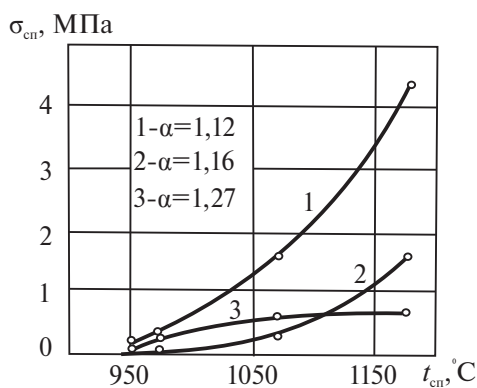


Рис. 12.7. Влияние коэффициента избытка воздуха на спекаемость вторичных отложений экибастузского угля

Практика показывает неоднозначность эффекта рассмотренных мероприятий по предупреждению шлакования. Низкотемпературное сжигание бурых углей (котел Е-500, П-67) с высокой долей рециркуляции дымовых газов, со снижением уровня и неравномерности тепловых нагрузок топочных экранов приводит к уменьшению интенсивности отложений.

Однако режим этот связан с образованием трудно удаляемых отложений с повышенным содержанием железа. Так что трудности при сжигании березовского угля не устранены в полной мере. Разрабатываются новые технологии сжигания, ориентированные на предотвращение шлакования и загрязнения подготовкой топлива:

- смешение топлив с различными шлакующими свойствами [9];
- предварительная термообработка угля;

- газификация угля в шлаковом расплаве;
- деминерализация угля.

## *2) Влияние организации топочного процесса на условия шлакования*

Известно, что условия шлакования определяются как характеристикой газового потока с частицами летучей золы (температура, тепловые потоки, газодинамика), так и шлакующими свойствами частиц летучей золы.

В режиме трехступенчатого сжигания складываются специфические условия процесса шлакования. Формирование при этом локальных и подчас обширных восстановительных зон неблагоприятно с позиций шлакования поверхностей котла. Прохождение летучей золы через зону восстановления усиливает ее шлакующие свойства. Последующее прохождение золы через зону дожига с высокими избытками воздуха не в полной мере «ликвидирует» усиление шлакующих свойств. Сказываются также благоприятные изменения характеристик газового потока. Однако внедрение схемы трехступенчатого сжигания на котлах, за исключением единичных случаев неоптимального конструктивного решения, не столкнулось с проблемой усиления шлакования [7]. Более того, на ряде котлов отмечено улучшение ситуации по шлакованию экранов и пароперегревателя.

### *Перераспределение топлива по высоте топки*

С позиций шлакования топки благоприятным фактором при внедрении трехступенчатого сжигания является существенное (15–20 %) снижение подаваемого в основные горелки топлива. В большинстве случаев это компенсирует или превосходит влияние усиления шлакующих свойств золы и роста адиабатической температуры в зоне горелки.

### *Температура на выходе из топки*

Фактическая температура на выходе из топки при внедрении ступенчатого сжигания зависит от изменения тепловой эффективности экранов (теплового сопротивления загрязнений), распределения и выгорания топлива по высоте топки, от влияния подачи воздуха (и в некоторых схемах дымовых газов) выше ядра горения (эффект верхней рециркуляции). Для сильно шлакующихся топок определяющим может быть уменьшение шлакования и связанное с этим повышение тепловой эффективности экранов.

### *Распределение избытка воздуха по высоте топки*

При низких избытках воздуха, складывающихся в восстановительной зоне, также возможно усиление образования прочных первичных (железистых) отложений. Для некоторых из углей (с высоким содержанием в минеральной части компонентов кислого состава) это проявляется в снижении температуры начала шлакования  $t_{\text{шл}}$ , росте интенсивности шлакования и прочности образующихся отложений (спекаемости летучей золы).

Для снижения шлакования применена тангенциальная схема сжигания, при которой около экранов образуется окислительная зона. Первичный воздух и уголь направлены к воображаемой окружности в центре топки. Направление подачи вторичного воздуха смещено к концентричной окружности большего диаметра. Это способствует образованию окислительной атмосферы вблизи экранов.

### *3) Отключение или разгрузка группы вихревых горелок при ограничении выбросов оксидов азота*

Для управления процессом горения с целью ограничения выбросов оксидов азота и обеспечения бесшлаковочного режима в топках с несколькими ярусами вихревых горелок осуществляется поярусное ограничение или полное отключение по топливу группы горелок. При этом достигается:

- изменение температуры топочных газов на выходе из топки и соответствующее регулирование режима работы пароперегревателя, температуры острого пара, температуры металла пароперегревателя;
- снижение выхода оксидов азота.

## **12.4. Очистка поверхностей нагрева как фактор обеспечения бесшлаковочного топочного режима**

---

### **12.4.1. Современные подходы к очистке поверхностей нагрева**

Возможности организации топочного процесса для целенаправленного воздействия на шлакование и загрязнения не безграничны. Только одними конструктивными и режимными мероприятиями в большинстве случаев не удастся обеспечить длительную бесшлаковочную

кампанию таких котлов. По замечанию А. С. Заворина [5], это обстоятельство способствовало формированию одной из главных тенденций преодоления натрубных отложений — оснащение котлов средствами очистки, которая развивалась в самостоятельное направление в совершенствовании топочной технологии.

В использовании этих технологических средств наиболее эффективным методом контроля и управления системой очистки поверхностей нагрева является метод «интеллектуальной» очистки. Этот метод осуществляет режим очистки по программам искусственного интеллекта. В работе по прямому принципу компьютерная программа воспроизводит действия опытного оператора. В косвенных системах используется набор (с учетом исходных данных по качеству топлива) методов трехмерного математического моделирования, математики нечеткой логики, общих теоретических представлений, экспертных систем. Такие системы обладают свойством самоусовершенствования, «обучаются» на основе опыта предшествующих действий. Компьютерная программа вырабатывает алгоритм действий оператора с максимальным ограничением роста отложений с учетом конкретной конструкции топочной камеры, свойств топлива, режима работы топки.

Функционирование очистительной системы в рабочем режиме котла оказывает значительное влияние на общую работоспособность парогенератора. Необходимо обеспечить повышение надежности и производительности станций при наименьших затратах, а также снижение негативного влияния на состояние оборудования и окружающую среду. Такая задача определяет потребность в избирательной и высокоэффективной очистке котлов. Это означает проведение очистки поверхностей нагрева:

- на самой ранней стадии загрязнения;
- по принципу «ровно столько, сколько необходимо»;
- только в требуемых зонах;
- настолько эффективно, насколько необходимо.

Полностью исключить процессы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева представляется невозможным. Для проведения минимально необходимого объема и оптимальной периодичности очистки эффективным средством может послужить оперативный контроль за протеканием этих процессов и своевременная техническая диагностика с целью определения оптимального управляющего воздействия [10; 11].

В оптимальном использовании этих технологических средств наиболее эффективным методом контроля и управления системой очистки поверхностей нагрева является метод «интеллектуальной» очистки.

Комплекс интеллектуальной очистки *ISB (SmartCleanISBPlatform)* компании «Клайд Бергеманн» [12] включает четыре основных элемента:

- диагностика;
- адаптивный модуль;
- средства управления;
- оборудование — исполнительные механизмы.

Блок диагностики определяет текущее состояние отложений на поверхностях нагрева, степень зашлаковывания в различных зонах парогенератора с помощью набора измерительных устройств. Система диагностики состояния поверхностей нагрева позволяет иметь в режиме рабочего времени картину распределения загрязнения и шлаковых отложений. Наиболее характерные методы диагностики, применяемые в настоящее время в энергетике:

- компьютерная видеодиагностика с использованием камер, работающих в инфракрасном диапазоне, а также оптическая система непрерывного контроля температуры газов на выходе из топки в комплексе с видеосистемой;

- для характеристики локального загрязнения экранов на основе сопоставления падающего потока (термозонды, оптические пирометры) и воспринимаемого теплового потока (температурные вставки, которые дают достаточно точное представление об уровне и динамике нарастания толщины начальных отложений, но не позволяют судить о процессах нарастания шлаковых отложений значительной толщины).

Адаптивный модуль, получая соответствующую диагностическую информацию, определяет оптимальный режим очистки (где, когда, как). При этом сопоставляются такие показатели процесса очистки отдельно по радиационным поверхностям топки, конвективной части котла, воздухоподогревателю:

- количество операций по очистке обслуживаемой зоны;
- эффективность очистки (по влиянию на состояние котла);
- затратность.

На основе сопоставления этих показателей осуществляется интеграция различной диагностики, оценки затрат и эффективной очист-

ки. Формируется в режиме реального времени наиболее эффективный порядок очистки поверхностей нагрева.

Для автоматизированной разработки и визуального проектирования схем водяной обдувки топочных экранов с применением дальнобойных, мало- и глубоководных аппаратов создана экспертная компьютерная система программ VisualJETS2 [13]. Программа позволяет: определить оптимальное расположение, количество и типы обдувочных аппаратов; определить конфигурацию и размеры зон обдувки отдельных аппаратов и общей очищаемой зоны; выбрать оптимальные параметры обдувочных аппаратов.

Программа позволяет определять:

- наибольшие углы вертикальной и горизонтальной разверток струи дальнобойного аппарата в зависимости от глубины топки, давления воды;
- эффективную длину струи дальнобойного аппарата в зависимости от давления воды и интенсивности шлакования;
- границы зон эффективной очистки дальнобойного маловыдвижного аппарата;
- схему расположения дальнобойного аппарата на экранах топочной камеры.

Программа позволяет определять оптимальное расположение, количество и типы аппаратов, конфигурацию и размеры зон обдувки аппаратов и общей очищаемой зоны топочной камеры, выбрать оптимальные параметры аппаратов и рабочего агента.

#### *Блок управления*

Обеспечивает визуальную, возможность поддержки и обновления программного обеспечения, устранения неисправностей, сбоя, а также контроль состояния исполнительного оборудования систем очистки.

#### *Оборудование очистки*

Осуществляет необходимые операции в требуемой зоне, в требуемом режиме. Для реализации этих операций используются:

- водяные пушки, маловыдвижные и глубоководные обдувочные аппараты для очистки топочной части котла;
- выдвижные паровые обдувочные аппараты;
- пароводяные обдувочные аппараты;
- сажеобдувочные аппараты выдвижные (пар, воздух, вода) для селективной очистки заданных зон конвективных теплообменных поверхностей.



### 12.4.2. Средства очистки поверхностей нагрева в топке

Водяная и паровая обдувка являются наиболее универсальными и в большинстве случаев для своей области применения самыми эффективными методами очистки поверхностей нагрева. На котлах ЗИО они применяются в качестве основных средств очистки топочных экранов, полурадияционных и конвективных поверхностей нагрева.

#### *Водяная обдувка*

Для очистки топочных экранов в большинстве случаев используются аппараты водяной обдувки, которые являются наиболее эффективным средством удаления наружных отложений золы. В качестве устройств водяной обдувки экранов топочной камеры применяются два типа аппаратов:

- дальнобойные аппараты, которые колебательным реверсивным движением сопла направляют струю через топку, осуществляя обдувку противоположной и боковых стен; дальнобойные аппараты водяной обдувки обеспечивают эффект очистки преимущественно за счет термического воздействия водяных струй на слой золowych отложений;
- маловыдвижные аппараты, осуществляющие при выдвижении сопловой головки в топку обдувку «на себя».

Для охвата стен топочной камеры, для очистки всей топки обычно необходима установка всего 4–8 аппаратов на котел. Для котлов с крупногабаритными топочными камерами эффективность очистки дальнобойными аппаратами снижается вследствие ограниченной дальнобойности водяных струй, в особенности в условиях работы топочных камер котлов. В связи с этим в схемах очистки топочных камер котлов начали широко применять маловыдвижные аппараты водяной обдувки. Эти аппараты обычно имеют радиус обдувки до 4–4,5 м и формируют струю с большим гидродинамическим воздействием на слой золowych отложений, чем у дальнобойных аппаратов. Маловыдвижные водяные аппараты устанавливаются как для полной очистки топочных камер, так и для локальной очистки в зонах топки с наибольшей интенсивностью загрязнения.

#### *Паровая обдувка*

В настоящее время для очистки полурадияционных и конвективных поверхностей в основном применяются аппараты паровой обдувки. В труднодоступных местах могут также дополнительно устанавливаться устройства паровой «пушечной» обдувки. В обоих случаях осуществляется динамическое воздействие на отложения. В качестве рабочего

агента используется перегретый пар. Аппараты паровой обдувки устанавливаются в топочной камере в случае невозможности использования водяной обдувки по условиям надежности металла труб (в частности, для некоторых радиационных пароперегревателей, имеющих сравнительно высокую температуру металла труб). Паровая обдувка топочных экранов может также использоваться при сжигании углей с низкой склонностью к шлакованию. Обдувка трубных пучков осуществляется преимущественно глубоководными аппаратами с винтовым движением сопловой трубы. Для котлов мощных блоков требуемая глубина выдвижения обдувочной трубы достигает 10–12 м [10].

В последние годы проектируемые и работающие отечественные котлы в основном оснащаются аппаратами очистки, разработанными и выпускаемыми фирмами и предприятиями «Бергеманн», «Трансочистка» и «Красмашзавод» [14; 15].

#### 12.4.3. Современные аппараты паровой обдувки

ОФ «Трансочистка» изготавливает аппараты паровой обдувки (рис. 12.8, 12.9) в двух вариантах:

- аппараты обдувки маловыдвижные типа МПТО (ОМП-м);
- аппараты глубоководные ОПТО трех типоразмеров с ходом сопловой головки до 4, 8 и 10 м. Имеется разработанная конструкция аппарата ОПТО-12 с ходом сопловой головки до 12 м.



Рис. 12.8. Водяная пушка

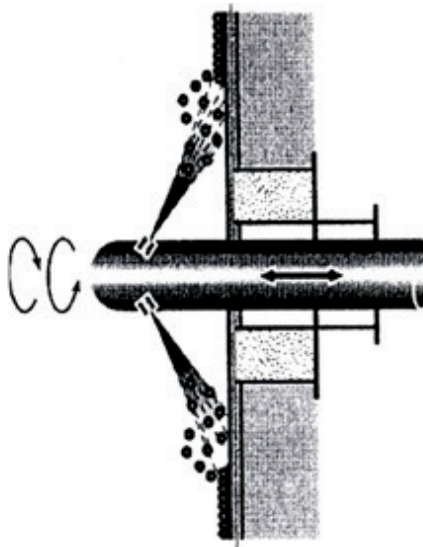


Рис. 12.9. Маловыдвижной аппарат  
(вода или пар)

«Бергеманн» [15] представляет следующие аппараты паровой обдувки:

- маловыдвижной аппарат паровой очистки (тип V92-E);
- глубоковыдвижные аппараты (типы PS-SL, RK-SL, RL-SL);
- винтовой аппарат (типы PS-SB, RK-SB);
- аппарат со стационарным вращающимся элементом (тип D92-E);
- траверсный аппарат (тип PS-AT), глубина хода до 10 м у аппаратов типа PS, до 14 м — типа RK и до 20 м — типа RL.

ГП «Красмашзавод» выпускает глубоковыдвижные аппараты двух модификаций: 221ЭОБ080 и 221ЭОБ081 («Красмаш»). Полный ход сопловой головки — до 8 м.

Предприятие «Энергософин» (СП с фирмой TampellaPower) в г. Белгороде выпускает аппараты паровой обдувки для конвективных и ширмовых поверхностей нагрева.

ГП «Красмашзавод» производит аппараты водяной обдувки:

- аппарат маловыдвижной водяной обдувки 221ЭОБ006;
- аппарат дальнобойный водяной обдувки 221ЭОБ001.

Фирма «Бергеманн»:

- маловыдвижной аппарат водяной очистки (тип F-149);
- дальнобойный аппарат WLB 90 — «водяная пушка».

ОФ «Трансочистка» производит маловыдвижной аппарат водяной обдувки MBTO (аналог OBM).

---

## **12.5. Организация эвакуации золы и шлака из топки. Применение технологии сухого шлакоудаления**

---

Все большее распространение получает система сухого отбора, охлаждения, транспортировки и обработки золошлаковых отходов из паровых котлов с твердым топливом. Ведущей в мировой энергетике системой сухой обработки золошлаковых отходов для паровых котлов является технология сухого шлакоудаления «Магалди-МАС» (Италия) [16]. Такая технология обеспечивает надежное удаление падающих из холодной воронки котла частиц и агломератов шлака любых размеров (далее — шлака) от котлов, сжигающих уголь и другое орга-

ническое твердое топливо, существенным образом не только повышая надежность и экономичность системы шлакоудаления, но и уменьшая воздействие ТЭС на окружающую среду. Вода в системе шлакоудаления не используется, а следовательно, в ней и не образуются сточные воды. Система шлакоудаления МАС построена таким образом, что тепло от охлаждения шлака возвращается в котел, благодаря чему снижаются удельные расходы топлива на производство энергии. Это приводит к снижению потребления топлива и уменьшению газообразных выбросов, включая выбросы парникового газа  $\text{CO}_2$ . Основное оборудование головной части системы шлакоудаления включает в себя механический компенсатор теплового расширения, приемный бункер шлака, экстрактор и первичный измельчитель для дробления шлака. Схема шлакоудаления МАС с отгрузкой крупнодробленого шлака представлена на рис. 12.10.

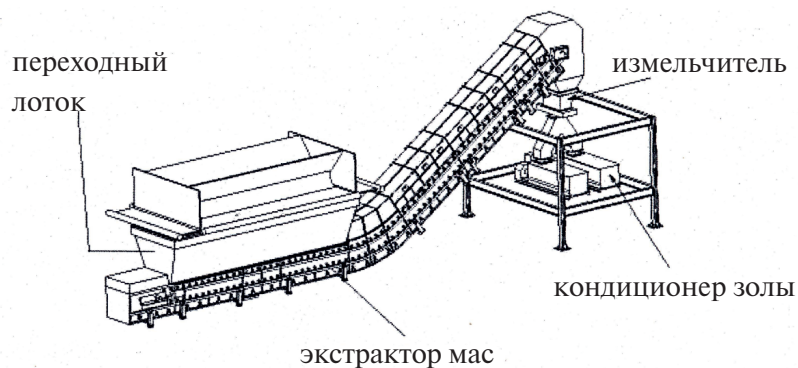


Рис. 12.10. Устройство сухого шлакоудаления «Магалди-МАС»

### Механический компенсатор теплового расширения

Механический компенсатор обеспечивает герметичное соединение воронки котла с приемным бункером шлака системы шлакоудаления. Герметичное соединение состоит из нескольких слоев специальных тканевых и керамических материалов, обеспечивающих достаточные теплоизоляцию и механическую прочность при необходимой гибкости для компенсации тепловых расширений соединяемых узлов.

### Приемный бункер шлака

Приемный бункер шлака соединен через компенсатор теплового расширения с воронкой котла и имеет определенный объем для хранения шлака при кратковременных остановках системы шлакоудаления. С внутренней стороны бункер шлака покрыт теплоизоляцией и огне-

упорными материалами для предохранения его от излишнего нагрева и истирания. Приемный бункер шлака в нижней части имеет подвижные створки, приводимые в движение гидросиловым блоком. Поверхность створок, соприкасающаяся со шлаком, покрыта огнеупорными материалами. При полном закрытии створок падающий из котла шлак можно хранить в приемном бункере некоторое время, достаточное для кратковременного ремонта незначительных неисправностей в системе шлакоудаления, что существенно повышает надежность ее работы.

### **Экстрактор**

Экстрактор является ключевым компонентом и основой любого варианта системы шлакоудаления. Он предназначен для надежного удаления падающего из холодной воронки котла шлака с высокой температурой и при его ударном воздействии. Основные функции экстрактора — удаление и охлаждение шлака для его дальнейшей транспортировки и переработки. Основным элементом экстрактора является суперлента «Магалди» с эффективной шириной 1200 мм, которая состоит из стальной ячеистой ленты и находящихся на ней стальных поддонов, частично наложенных друг на друга. Лента поддерживается несущими роликами поперек всей ее ширины для противостояния тяжелым механическим воздействиям падающего высокотемпературного шлака. Опоры несущих роликов находятся с внешней стороны кожуха в целях предохранения их от нагревания и обеспечения легкого доступа при обслуживании. Лента находится внутри герметичного кожуха экстрактора, который исключает неорганизованные присосы воздуха извне, а также просыпь шлака и выброс газа в окружающую среду. Частицы золы, которые могут упасть на дно корпуса, удаляются вспомогательной цепью, установленной под конвейерной суперлентой. Через специальные отверстия в кожухе за счет разрежения в топке поступает наружный воздух, который не только охлаждает горячий шлак, приемный бункер шлака, транспортную ленту, но также обеспечивает возможность дожигания на ленте несгоревшего углерода.

### **Первичный измельчитель шлака**

Транспортируемый шлак поступает в первичный измельчитель для его дробления и дальнейшего продвижения по системе шлакоудаления. Первичный измельчитель шлака представляет собой однорولیковую дробилку и предназначен для дробления агломератов шлака любых размеров, проходящих через холодную воронку котла. Макси-

мальный размер кусков шлака на выходе из первичного измельчителя составляет не более 80 мм.

Влияние представленной системы сухого шлакоудаления на эффективность работы котла и связанной с ним системы золоудаления определяется следующими основными конструктивными и технологическими особенностями:

- для охлаждения и транспортировки золы не используется вода;
- возврат тепловой энергии от золошлаковых отходов в котел;
- простота в эксплуатации и в техобслуживании;
- высокая надежность и безопасность;
- получение сухих золошлаковых материалов (ЗШМ).

Экономическая эффективность:

- повышение КПД котла;
- снижение эксплуатационных затрат;
- повышение потребительских качеств шлака как полезного побочного продукта;
- снижение затрат на размещение шлака на золошлакоотвалах.

В традиционных системах гидрошлакоудаления приемный бункер наполнен водой для охлаждения шлака и герметизации холодной воронки котла. Через выходное отверстие холодной воронки в приемный бункер проходит радиационный поток из топки (радиационный поток в холодной воронке котла с плотностью около  $40 \text{ кВт/м}^2$ ). В результате потерь тепла с удаляемым шлаком и испарения влаги вследствие радиационного теплообмена между топкой и приемным бункером снижается КПД котла. Кроме того, испаряемая влага из приемного бункера шлака поступает в топку, увеличивая в итоге влагосодержание уходящих газов. В системе сухого шлакоудаления для охлаждения шлака и технологического оборудования используется воздух, который поступает в топку и участвует в процессе сжигания топлива. Количество охлаждающего воздуха обычно составляет 0,5–1,5 % общего количества, поступающего на горение. Это позволяет в значительной мере вернуть в топку тепло из бункера шлака (температура которого составляет около  $850^\circ\text{C}$ ), что повышает КПД котла. На рост КПД также влияет дожигание содержащегося в шлаке углерода. В целом до 90 % всего тепла, содержащегося в золошлаковых отходах, возвращается в топку. Низкое содержание недожога в шлаке снимает серьезные ограничения по этому фактору на выбор технологий использования шлака при его переработке в продукцию различного назначения.



Сухие золошлаковые смеси пользуются значительно большим спросом, чем увлажненные.

*Экологическая эффективность:*

- исключается потребление воды из природных водоемов;
- исключается образование высокозагрязненных вод из системы охлаждения и гидротранспорта шлака;
- обеспечивается возможность максимального повторного использования сбросных вод.

*Сокращение состава технологического оборудования:*

- нет нужды в осушительных баках и очистке сточных вод;
- не нужны насосы, теплообменники; нет контроля уровня рН.

*Надежность и безопасность установки и повышение надежности системы:*

- система безопасна, т. к. все движущиеся детали находятся внутри корпуса и во время эксплуатации не требуется дополнительного вмешательства; корпус закрыт, поддерживает низкую температуру;
- система способна выдерживать удары самых больших кусков шлака, которые могут упасть из котла. Размер частиц золы: от летучей золы до сплава в несколько кубометров;
- износ конвейерной ленты незначителен, т. к. между лентой и шлаком нет взаимного смещения. Ожидаемый срок эксплуатации конвейерной ленты «Магалди» по меньшей мере 10 лет;
- отсутствует коррозия конструктивных узлов;
- исключена возможность выплескивания горячей воды, выброса пара.

## **12.6. Развитие коррозионных процессов в топке — высокотемпературная окислительная и восстановительная коррозия и пути ее ограничения**

---

Эксплуатационный опыт и специальные исследования позволили выявить различные механизмы высокотемпературных термохимических процессов в топке и связанное с ними коррозионное воздействие продуктов сгорания на состояние металла экранов и пароперегревателя (углеродистая сталь, легированные стали и сплавы) [17–19]. В по-



следнее время, по словам А. Н. Алехновича [20], рассматриваются также новые механизмы коррозии, экспериментальное и теоретическое обоснование которых не вполне завершено. Выделяются следующие основные механизмы высокотемпературной коррозии металлов, развивающиеся в топочной камере:

- 1) высокотемпературная сероводородная коррозия;
- 2) высокотемпературная подшлаковая коррозия (сульфатными расплавами);
- 3) высокотемпературная углеродная коррозия (при наличии несгоревшего углерода в натрубных отложениях);
- 4) высокотемпературная сульфидная коррозия (при наличии в натрубных отложениях значительного количества  $\text{FeS}_2$ );
- 5) высокотемпературная хлорная коррозия (преимущественно при воздействии хлоридов щелочей);
- 6) высокотемпературная ванадиевая коррозия (пары пятиокси ванадия  $\text{V}_2\text{O}_5$ );
- 7) восстановительная коррозия (в бескислородной зоне топки при наличии в топочных газах продуктов неполного горения).

При таком многообразии процессов коррозии едва ли возможен некий универсальный метод предотвращения коррозии. Определены некоторые условия снижения агрессивности продуктов сгорания [21], сформировался набор технологических мероприятий по следующим направлениям:

- **ограничение контакта продуктов горения** топлив, содержащих потенциально агрессивные компоненты, с поверхностями нагрева — воздушные, газовые экраны, смещение факела к оси топки, ограничение дальнотойности факела [20; 21];
- **предварительное обезвреживание топлива** (например, газификация нефтекокса, концентрирующего в себе соединения серы, ванадия, содержащихся в мазуте, с очисткой полученного газового топлива [20]);
- **снижение интенсивности коррозионных процессов** путем снижения температуры в топке (сжигание топлива в низкотемпературном вихре, двухзонный процесс в топке, сжигание в циркулирующем кипящем слое); уменьшением содержания кислорода в дымовых газах снижением избытка воздуха [22–27].

Отсутствие опыта эксплуатации подобной технологии в отечественной энергетике и оборудования заставляют ограничиться изложением

ем рекламных материалов, имея в виду свидетельства об их практическом использовании в мировой энергетике.

## **Литература к разделу 12**

---

1. Ахмедов Р. Б. Основы регулирования топочных процессов. М. : Энергия. 1977.
2. Алехнович А. Н. Шлакование пылеугольных котлов. М. : Энергопрогресс, 2013.
3. Тишин А. П. Использование средств численного моделирования для обеспечения требуемого качества топочных процессов // Теплоэнергетика. 2013. № 6.
4. Серант Ф. А., Маршак Ю. Л., Витухина Э. М. Исследование на модели топки котла П-67 пристенной газовой завесы для локальной защиты топочных экранов от шлакования // Теплоэнергетика. 1988. № 1.
5. Заворин А. С. Фактор минеральной части топлива в технологиях сжигания низкосортных углей // Вестник науки Сибири. 2011. № 1. Серия 4 «Энергетика». С. 121–132.
6. Бойко Е. А., Жадовец Е. М. Имитационная динамическая модель шлакования поверхностей нагрева паровых котлов // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов : сб. Сибирский федеральный университет, г. Красноярск. Челябинск, 2007.
7. Алехнович А. Н., Богомолов В. В. Влияние схем сжигания и режимов на шлакование // Электрические станции. 2002. № 4.
8. Миронов С. Н. Организация и регулирования режимов камерного сжигания угольной пыли. М. : Энергия, 1972.
9. Повышение бесшлаковочной мощности топочных устройств путем сжигания смеси углей/Л. И. Пугач [и др.] // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов : материалы IV Всесоюзной конференции. Таллинн. 1986. Ч. 1.
10. Майданик М. Н., Щелоков В. И., Пухова Н. И. Проектирование и схема наружной очистки поверхностей нагрева котлов // Минеральная часть топлива. Шлакование, загрязнение и очистка

- котлов : материалы третьей научно-практической конференции. Челябинск, 2001.
11. Алехнович А. Н. Состояние и проблемы расчета теплообмена в пылеугольных топках // Электрические станции. 2015. № 3 (1004). С. 32–35.
  12. Мессинг М. М., Юрвес А. («Клайд Бергман ГмбХ»). Система очистки поверхностей нагрева фирмы «Клайд Бергман ГмбХ» // Минеральная часть топлива. Шлакование, загрязнение и очистка котлов : материалы третьей научно-практической конференции. Челябинск, 2001.
  13. Майданик М. Н., Колбасников В. А., Васильев В. В. Экспертная компьютерная система очистки топочных экранов котлов // Минеральная часть топлива. Шлакование, загрязнение и очистка котлов : Материалы четвертой научно-практической конференции. Челябинск. 2007.
  14. Васильев В. В., Алехнович А. Н. Аппараты паровой и водяной обдувки на рынке России // Минеральная часть топлива. Шлакование, загрязнение и очистка котлов : Материалы четвертой научно-практической конференции. Челябинск, 2007.
  15. Порозов С. В., Васильев В. В. Обдувочные аппараты, поставляемые «Клайд Бергман ГмбХ» // Минеральная часть топлива. Шлакование, загрязнение и очистка котлов : материалы четвертой научно-практической конференции, Челябинск. 2007.
  16. Чианчи В., Коппола Д. Применение технологии пневмомеханического шлакоудаления на угольных электростанциях и мусоросжигательных заводах : международный научно-практический семинар «Золошлаки ТЭС — удаление, транспорт, переработка, складирование», 2007.
  17. Внуков А. К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. М. : Энергия, 1981.
  18. Магадеев В. Ш., Петросян Р. А., Конторович И. С. Влияние режимных факторов на коррозионную агрессивность продуктов сгорания // Теплоэнергетика. 1971. № 9.
  19. Магадеев В. Ш., Петросян Р. А. Условия снижения коррозионной агрессивности продуктов сгорания сернистого мазута // Электрические станции. 1975. № 3.
  20. Алехнович А. Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск : б. и. 2012.

21. Методические указания по проектированию топочных устройств. СПб., 1996. С. 72.
22. Решение проблемы шлакования и загрязнений энергетических котлах на базе использования низкотемпературной вихревой техночасть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов / Ю.А. Рудыгин [и др.] // Сб. докладов Второй научно-технической конференции. Челябинск, 1996. Т. 1.
23. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г.А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. 2009. № 12.
24. Саламов А.А. Котлы с ЦКС с керамическими системами защиты экранов // Энергетика за рубежом. 2015. № 3. С. 11–13.
25. Долгушин И.А., Рябов Г.А., Седлов А.С. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС в целях повышения эффективности и улучшения экологических показателей // Энергетик. 2014. № 8. С. 33–36.
26. Серант Ф.А. Котел для блока 600 МВт на экибастузских углях с тангенциальной компоновкой и вихревыми низкоэмиссионными горелками // Горение твердого топлива : сб. VII Всероссийская конференция. Новосибирск, 2009. Ч. 1.
27. Горбаненко А.Д., Морозов О.В. Сжигание природного газа в забалластированном окислителе // Теплоэнергетика. 1991. № 3. С. 38–40.

---

## 13. ИТОГИ И УРОКИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ XX В.

---

### 13.1. Анализ предшествующего опыта совершенствования топочной техники

---

**А**нализируя предшествующий период развития технологий и оборудования систем сжигания энергетического топлива в нашей стране, можно констатировать прежде всего, что эти процессы развития соответствовали основным актуальным требованиям, основным тенденциям развития энергетики по мере их формирования, утверждения в практике, смены новыми задачами. На разных этапах развития энергетики приоритетными служили различные, сменяемые со временем проблемы:

- *рост единичной мощности топочных устройств* (потребовавший переход от слоевого к факельному сжиганию);
- *перестройка структуры топливного баланса* (от преобладания торфа к угольной энергетике, переход на низкокачественные высококалорийные топлива, газификация отрасли), что потребовало создания

нового типа топок и горелочных устройств, новых систем подготовки топлива к сжиганию, решения новых технических проблем — размол угля, шлакование топки;

- *повышение экономичности традиционной технологии энергопроизводства* (этому соответствовала необходимость совершенствования топочных устройств — уменьшение недожога, расхода энергии на собственные нужды; автоматизация топочных процессов);

- *совершенствование термодинамического цикла энергопроизводства* с внедрением парогазовой технологии как условия резкого скачкообразного повышения КПД производства электроэнергии от 38 до 60 % (принципиально новые способы сжигания топлива в камерах сгорания ГТУ, устройства для подогрева воздуха в потоке после ГТУ на входе в котел-утилизатор);

- *нарастающие экологические ограничения*, которые становятся важнейшим фактором развития энергетики (для топочных устройств требуется сокращение вредных выбросов в атмосферу, ограничение складирования золошлаков, использование в качестве топлива промышленных и бытовых отходов, биогаза; возобновляемых природных ресурсов).

Очевидно, что наши отечественные специалисты в сфере топочной техники находили адекватные научные, технологические и конструктивные решения, используя при этом опыт зарубежной энергетики. Решать их приходилось в сложнейших условиях первых пятилеток при ограниченности квалифицированных кадров, интенсивных темпах создания нового энергетического оборудования и сооружения новых электростанций; в условиях военного времени при перемещении энергетических мощностей на восток страны, послевоенного восстановления разрушенных электростанций, затем стремительного освоения новых углей. Это был поистине подвижнический труд — творческий, подчас самоотверженный.

Разработанные и внедренные на ТЭС технические разработки в топочной технике отличаются *высоким научно-техническим уровнем, высокой культурой конструктивных разработок*. Именно такая особенность развития топочной техники и энергетики в целом позволила создать гигантский энергетический комплекс, который до последних десятилетий оставался по всем основным показателям на уровне лучших мировых образцов. Топочно-горелочное оборудование наших электростанций показало чрезвычайную устойчивость

при резких изменениях структуры топливоснабжения, персонал ТЭС во взаимодействии с наладочными и отраслевыми научными и проектными организациями показал готовность успешно адаптировать оборудование к новым условиям. Характерно, что многие технологические и конструктивные решения в топочной технике прошлого века остаются в арсенале современных средств развития топочной техники. Так, спустя многие десятилетия высокий уровень топочной технологии и оборудования для слоевого сжигания позволил вновь обратиться к ней. Слоевоe сжигание послужило основой для создания принципиально новых технологий кипящего и циркулирующего кипящего слоя, комбинированных факельно-слоевых топок, для оснащения факельных пылеугольных топок устройствами для дожигания крупных фракций провала в слое на решетках. Чем обеспечивается такой уровень совершенствования топочных устройств? Тесное взаимодействие отраслевых научно-технических центров, проектных и наладочных организаций, региональных энергообъединений и персонала ТЭС при активной поддержке отраслевого Министерства. Все эти компоненты единой структуры — энергетики страны — решали совместно общую задачу на общую цель. Удачные проекты широко пропагандировались, поощрялись.

Непременной, важнейшей особенностью развития топочных технологий и топочного оборудования в предшествующий период является *непрерывность совершенствования* в рамках такой консервативной отрасли как энергетика.

В условиях расформирования единого энергетического комплекса страны, нарушения единства технической политики, целевого финансирования новых разработок важным стимулом оставалась сложившаяся у энергетиков традиционная высокая профессиональная ответственность.

Несмотря на трудности последнего десятилетия, продолжались усилия по совершенствованию топочных технологий. Удалось опробовать и внедрить на ТЭС целый ряд новых технологий использования топлива, созданных отечественными специалистами и не имеющих ко времени их разработки зарубежных аналогов.

Особенность совершенствования технологий и оборудования систем сжигания в российской энергетике заключается в *активном участии в этих процессах широкого круга специалистов, в том числе*



«с мест» — инженерно-технических работников региональных энергообъединений и ТЭС, региональных инжиниринговых структур, а также заинтересованного участия эксплуатационного персонала ТЭС в практической реализации проектов рационализации топочно-горелочных устройств.

Региональными инженерными организациями созданы такие значимые технологические решения по топочно-горелочным устройствам:

- уникальный прямоточный котел Рамзина с высокими параметрами пара — ВТИ (1934 г.);
- вихревые пылеугольные горелки — УралОРГРЭС (1956 г.);
- трехступенчатое сжигание с получением восстановительной среды из угля (УралОРГРЭС, 1993 г.);
- топка с низкотемпературным вихрем — НТВ (ЛПИ);
- кольцевая топка (СибКОТЭС, 2004 г.);
- система подогрева угольной пыли пред вводом в топку (УралОРГРЭС, 2003 г.);
- плазменные безмазутные растопочные устройства (отраслевой центр ПЭТ, 2006);
- двухпоточные горелки с разделительным каналом между воздушными потоками в горелке (УралОРГРЭС, 2008 г.).

Определенная часть достижений в разработке методов улучшения характеристик энергооборудования связана с творческими поисками, профессиональной активностью работников ТЭС, которые в наибольшей мере учитывают особенности оборудования и условий его эксплуатации для конкретных ТЭС. Это **уникальное свойство отечественной энергетики самосовершенствования ТЭС, осуществляемое собственным инженерным потенциалом энергопредприятий, энергосистем**, привело к созданию ряда технологических решений отраслевого значения. Характерными примерами являются создание специалистами Красногорской ТЭЦ эффективного оборудования для золошлакоудаления (аппараты Москалькова), разработанная на Томь-Усинской ГРЭС система транспорта пыли высокой концентрации под давлением (ТПВКд), которая в настоящее время используется на многих ТЭС страны, первый в России действующий котел с циркулирующим кипящим слоем (УПИ (УрФУ), УралОРГРЭС), утилизация физической энергии природного газа — первая в стране расширительная газовая турбина СУГРЭС (УПИ (УрФУ), УТМЗ).

## **13.2. Задачи специалистов-топочников на ближайшую перспективу**

---

При сложившейся в стране кризисной ситуации неизбежно торможение и в развитии энергетики: сокращение вводов новых генерирующих мощностей, уменьшение реконструктивных работ, направленных на совершенствование энергопроизводства. Поэтому на ближайшую перспективу задача специалистов-топочников заключается в удержании в эксплуатации существующего оборудования, адаптации его к использованию нового, непроектного топлива, поддержании экологических параметров котлов на уровне установленных нормативов ПДВ, обеспечении надежности горелочных устройств, сокращении использования мазута на растопку. Таким образом, и в нынешней ситуации необходимо действовать (как и в предыдущие периоды) соответственно складывающейся тенденции в энергетике в целом:

- обеспечить стабильность производства и отпуска энергии;
- удерживать в эксплуатации оборудование, выработавшее ресурс, с продлением его, при необходимости с перемаркировкой на сниженные параметры;
- реновация оборудования с ограниченными инвестициями для обеспечения надежности.

Вместе с тем необходимо продолжать разработку ряда перспективных научно-технических проблем, которые находятся на стыке интересов различных отраслей:

- 1) совершенствование термодинамического цикла Брайтона — Ренкина;
- 2) использование локальных топливных ресурсов — попутный природный нефтяной газ, топливный газ, получаемый при переработке нефти, нефтекокс, шахтный метан, промышленные и бытовые отходы, биотопливо;
- 3) газификация угля, использование водоугольных суспензий, водомазутной эмульсии;
- 4) перевод котлов в режиме низкотемпературного вихревого сжигания;
- 5) подготовка угля к сжиганию (десульфуризация, деминерализация, оптимизация размола, предварительная термообработка угольной пыли);

б) направленное ведение топочного режима с обеспечением потребительских качеств золы по недожогу, фракционному составу.

Общая направленность этих проектов предполагает повышение эффективности и экологичности топочного процесса, расширение структуры топливного баланса ТЭС.

В посткризисный период, когда будут исчерпаны задачи сохранения живучести отрасли за счет поддержания исходных характеристик оборудования путем проведения ремонтных и наладочных работ, последует период эволюционного развития энергетики — реконструкция оборудования ТЭС с улучшением технико-экономических и экологических характеристик, с замещением устаревшего оборудования, с нарастающим вводом новых генерирующих мощностей и сооружением новых ТЭС. Здесь усилия в сфере топочной техники будут, по-видимому, направлены на решение следующих задач:

- максимальное использование отработанных эффективных технологий, внедрение которых сдерживалось в условиях кризиса;
- приспособление топочно-горелочного оборудования к широкому спектру топлив;
- широкое внедрение парогазовой технологии на природном газе на основе отечественного оборудования вводом новых ПГУ-энергоблоков, сооружением ПГУ-ТЭЦ, реконструкцией ТЭС надстройкой газотурбинных установок;
- создание и внедрение угольных парогазовых установок;
- развитие систем сухого удаления и сухого складирования золошлаков, направленное на повышение потребительских качеств золошлаковых отходов, образующихся в процессе подготовки и сжигания топлива с целью максимальной их утилизации;
- последовательное сокращение выбросов соединений серы, предотвращение выбросов ртути на пылеугольных ТЭС;
- максимальное использование возобновляемых природных ресурсов для объектов распределенной энергетики.

### **13.3. Отдаленные перспективы развития технологии энергопроизводства**

---

Надежное будущее страны предполагает создание новой энергетики — на основе новых современных и разрабатываемых технологий, создаваемых отечественными учеными и инженерами, эффективно-

го использования мирового опыта. Поэтому, несмотря на снижение интенсивности совершенствования технологии энергетического использования твердого топлива, ориентированное на ближайшие годы, важно уже сейчас вести, углублять исследования, ориентированные на 20–30 и более лет вперед. Для взвешенного, осторожного прогноза на длительный срок требуется комплексный системный подход, предусматривающий учет, анализ всех значимых внешних и внутренних факторов, включая наличие научного задела, интеллектуального потенциала в топочной технике, смежных отраслях — по созданию новых конструкционных материалов, способам их обработки, созданию новых топлив для энергетики, принципиально новых способов преобразования потенциальной энергии топлива. Необходима объективная оценка прогнозов развития мировой энергетики на 50 лет вперед, а также долгосрочный прогноз по мировому топливному рынку, мировому рынку электроэнергии, рынку энерготехнологий и энергооборудования. На эти сведения накладываются прогнозы экономического, социально-экономического развития страны в целом и отдельных регионов России, а также оценка топливных ресурсов энергетики. В итоге оцениваются и ранжируются отдельные параметры новых разработок на стадии их формулирования по следующим параметрам:

- состоятельность технических и технологических разработок;
- обеспеченность ресурсами по сырью, материалам, топливу;
- затратность получаемой энергии для различных условий;
- экологичность производства электроэнергии;
- конкурентоспособность на внутреннем и мировом рынках.

Можно выделить некоторые новые зарождающиеся и нарастающие тенденции в развитии энергетики XXI в., которые неизбежно повлекут создание новых технологий использования топлива, нового энергооборудования:

1) формирование наряду с централизованным производством энергии и энергоснабжения распределенной энергетики — развитие локальных, индивидуальных источников энергии, производящих энергии соответственно потребностям данного потребителя, не поставляющего энергию в некую общую систему энергоснабжения;

2) развитие процессов прямого получения электроэнергии из органического топлива:

- исключая промежуточные процессы преобразования тепловой энергии в механическую; получение электроэнергии осуществ-

вляется непосредственно за счет тепловой энергии — термоэлектрогенераторы, термоэмиссионные преобразователи;

— исключающие тепловую энергию из цикла производства электроэнергии, которое осуществляется непосредственно преобразованием потенциальной химической энергии топлива, — топливные элементы.

Задача заключается в обеспечении достаточной мощности, улучшении технико-экономических показателей технологий.

3) получение искусственным путем новых энергетических топлив вместо ископаемых;

4) сокращение выбросов тепличных газов.

### **13.4. Снижение выбросов парниковых газов**

При всей неоднозначности этой проблемы необходимо учитывать систему международных соглашений, общественного давления, а с другой стороны реальные экономические факторы. Известные подходы к ограничению выбросов  $\text{CO}_2$  сопряжены со снижением мощности энергоблоков, оснащаемых соответствующими устройствами, на 15–20 %, КПД блоков снижается на 6–9 %; удельная стоимость таких энергоблоков с нулевыми выбросами тепличных газов возрастает от 30 % до 90 %.

Поэтому для российской энергетики, с учетом экономических последствий экономических кризисов, целесообразно рассматривать эту проблему с учетом ее реализации в некоторой отдаленной перспективе. Реальное снижение выбросов  $\text{CO}_2$  неизбежно по мере повышения экономичности существующих и (прежде всего) новых электростанций. Учитывается, что ввод каждой парогазовой установки соответствует снижению выбросов  $\text{CO}_2$  на каждый произведенный кВт установленной мощности на 40–50 %. Этому также будет способствовать поддержание значительной мощности АЭС, сооружение новых гидроэлектростанций.

Конечно, заслуживают интереса проводимые в западных странах работы по снижению выбросов парниковых газов, захоронению углекислоты. Методы извлечения  $\text{CO}_2$  из газовых потоков известны в химической промышленности, в энергетике опыт их применения пока незначителен. Обсуждаются возможности использования для этого технологий сжигания топлива в чистом кислороде,

газификации угля с удалением углеродных соединений из получаемого газообразного топлива и замещением его водородом (водородные технологии).

Активно прорабатываются варианты захоронений углекислоты закачкой в грунт (при вытеснении нефти из скважин), закачка в глубокие слои океана.

Прогнозные оценки всем этим подходам давать рано, однако целесообразно рассматривать проблему захоронения углекислоты в качестве актуальной, но весьма долгосрочной проблемы.

### 13.5. Перспективные разработки

#### 1) Деминерализация угля

Одним из возможных перспективных способов облагораживания углей является **удаление неорганической части угля** — водорастворимой минеральной части и ионообменных катионов из углей путем промывки угля водой или кислотными или основными водными растворителями. Такие работы ведутся, например, в Австралии в рамках проекта «Ультрочистый уголь» (*Ultra Clean Coal (UCC) Project*). При удалении золы из угля с помощью растворов кислот и щелочей (HCl, HF, NaOH, KOH) обработанный уголь еще содержит 0,1–0,7 мас. % золы, включая  $60 \text{ млн}^{-1} \text{ Na}$ . Это превышает уровень, приемлемый для прямого введения угля в газовые турбины. К тому же стоимость указанной обработки угля является достаточно высокой, прежде всего из-за проблемы утилизации огромных объемов минерализованных растворов, образующихся при промывке углей. Для создания экономичного способа получения обеззоленного угля требуются другие доступные и способные к рециркуляции растворители.

Принципиально отличным от удаления неорганической части (обеззоливания) с помощью кислот и щелочей способом обеззоливания угля является **выведение из угольной массы органических компонентов** путем применения для обработки углей органических растворителей. В этом случае из углей экстрагируются только органические компоненты. Используемый растворитель должен удовлетворять главным требованиям:

- 1) высокая растворяющая способность органической части углей;
- 2) доступность по стоимости;

3) высокая стабильность при температурах 350–430 °С (оптимальных для экстракции) для обеспечения количественной рециркуляции в процессе производства обеззоленного угля.

В результате многолетних исследований найдено, что оптимальными растворителями являются ароматические растворители, содержащие производные нафталина, такие как метил- и диметилнафталины, и промышленные растворители на базе продуктов коксования углей, например легкое циркуляционное масло и сырое метилнафталиновое масло (СМНМ). Наиболее эффективным растворителем является СМНМ. Получены выходы экстракции 60–80 % от органической массы угля.

По предварительным оценочным расчетам стоимость самого производства гиперугля составит 9–11 долларов США на тонну. С учетом стоимости исходных углей цена гиперугля может составить 45–55 долларов США за тонну [1; 2].

## 2) Жидкое угольное топливо

Жидкий уголь отличается от нефти разным соотношением водорода и углерода. Для углей оно равно 0,7, для нефти — 1,2. Чтобы стать нефтью, углю надо «добрать» водорода, который ему отдадут вещества-доноры. У нас в стране наиболее проработана технология ожижения угля по методу Института горючих ископаемых — путем каталитического ожижения [3]. Схематично процесс гидрогенизации угля происходит следующим образом. При нагреве размельченного угля, перемешанного с донором, например тетралином, до 45 °С при давлении в 10–15 МПа тетралин отдает содержащийся в нем водород углю, который растворяется, превращаясь в жидкую массу, подобную мазуту. Это так называемая угольная нефть. Она по сути ничем не отличается от настоящей.

В реальных условиях процесс протекает с добавлением активирующих добавок и в присутствии железомолибденового катализатора. На Березовском разрезе построена полупромышленная установка СТ-75, потребляющая 75 т угля в сутки. Разрабатывается проект установки на 500 т угля в сутки.

В Китае в 2009 г. в опытно-промышленном порядке была сдана в эксплуатацию первая показательная производственная линия по прямому сжижению каменного угля, способная по проектной мощности выпускать 1 млн тонн жидкого топлива в год. С тех пор китайские работники науки и техники одну за другой освоили серию ключевых техноло-



гий, благодаря чему данная производственная линия функционирует нормально, а ее природоохранные и экономические показатели превышают изначально намеченные. На сегодня это пока единственная в Китае и даже во всем мире производственная линия, способная непосредственно превращать уголь в жидкое топливо в промышленных масштабах. Хотя до ее появления в некоторых странах мира, например в США, выполнялись испытания по прямой гидрогенизации угля и извлечению из него жидкого топлива, но до промышленных объемов дело еще не дошло. По расчетным данным, в настоящее время для производства на этой линии одной тонны жидкого топлива требуется всего 3,5 тонны угля, из которых 2 тонны угля используется в качестве сырьевого материала для изготовления конечной продукции. Коэффициент использования энергии на этой линии достигает 57,42 %, а на крупных ТЭС страны этот показатель составляет лишь около 30 %. По данным, в 2011 г. эта производственная линия принесла прибыль в размере 406 млн юаней (или примерно 64,5 млн долл. США), а в первой половине 2012 г. уже дала прибыль на сумму 797 млн юаней.

В ЮАР работает крупнейший в мире завод компании *SaSol* для производства из угля жидкого топлива. Из 45 млн т угля в год ежедневно получают 150 тыс. баррелей жидкого топлива (1 баррель = 159 л). Аналогичные проекты находятся в стадии строительства или разработки и в других странах — в Китае, на Филиппинах, в США.

Перспективы этой технологии в российской энергетике можно оценивать с учетом следующих противоречивых факторов:

- недостатком жидкого угольного топлива является наличие в них большого количества канцерогенных полициклических соединений. Требуется разработка технологий его производства и его сжигания, исключающих повышенный выброс в атмосферу канцерогенно опасных веществ;
- высокая стоимость производства жидкого угольного топлива (по опыту западных разработок) делает его неконкурентным с нефтью при существующих запасах, сложившейся ситуации с избытком нефти на мировом рынке нефти;
- некоторые специалисты полагают, что такое положение определяется сравнительно высокой стоимостью угля; как показывают экономические оценки, невысокая стоимость канско-ачинских углей (она значительно ниже, например, стоимости углей в Западной Ев-

ропе и США) позволит производить синтетическое жидкое топливо (СЖТ), метанол и другие органические продукты с меньшими приведенными затратами, чем из нефтей худших месторождений Западной Сибири;

– существенный недостаток такой технологии — необходимость в дорогом и дефицитном молибденсодержащем катализаторе. К тому же его очень трудно выделить для повторного употребления. Однако было обнаружено, что в качестве катализаторов можно с успехом использовать шламы переработки руд, добываемых в некоторых месторождениях Красноярского края.

Таким образом, эта технология ожижения угля должна еще пройти значительный путь совершенствования, прежде чем она станет практически пригодной для нашей энергетики.

### *3) Новые синтетические жидкие топлива из угля*

Новым перспективным видом синтетических жидких топлив, получаемых путем химической переработки угля, является диметиловый эфир (ДМЭ) — метиловый эфир  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$  [4]. Он представляет собой газ, который при давлении в 0,5 МПа переходит в жидкое состояние. ДМЭ характеризуется коротким полупериодом существования в тропосфере (менее одного дня), не поступает в стратосферу, полностью разлагается на воду и диоксид углерода, нетоксичен, неканцерогенный, немутагенный. Продукты сгорания его практически не содержат вредных выбросов. Этот продукт в перспективе сможет заменить сжиженный газ или газойль для большинства генераторов энергии. Российские ученые из московского Института нефтехимического синтеза РАН разработали рентабельную схему. Она предусматривает получение синтетического жидкого топлива не через стадию образования метанола, а из другого промежуточного вещества — диметилового эфира (ДМЭ), увеличив долю окиси углерода в синтез-газе. Синтез ДМЭ является по существу развитием технологии производства метанола. ДМЭ имеет калорийность выше метанола, затраты его на производство и транспорт ниже, чем для получения метанола. Теплотворная способность ДМЭ (28,4 МДж/кг) только немного ниже низшей удельной теплоты сгорания природного газа. Хранение ДМЭ гораздо проще, чем сжатого природного газа (метана) и сжиженного нефтяного газа (пропана). Метан, как известно, требует для хранения резервуары высокого давления и криогенные температуры, а пропан — емкости, изготовленные из двух сло-

ев нержавеющей стали. Диметилэфир же можно безопасно держать в обычных стальных емкостях длительное время.

Преимущества ДМЭ для транспорта очевидны. На тепловых электростанциях он может служить растопочным топливом, использоваться для подсветки пылеугольного факела, заменяя мазут и сжиженный природный газ.

#### 4) Технологии чистого сжигания угля в кислороде

Суть метода, имеющего экологическую направленность, заключается в том, что из воздуха выделяется кислород, подаваемый в топку с угольной пылью. При сжигании угля в чистом кислороде для снижения температуры в зоне горения для обеспечения надежности конструкции топки и поверхностей нагрева осуществляется рециркуляция дымовых газов в топку. Поскольку азот был удален из воздуха еще до подачи в топку, то исключается присутствие в дымовых газа «воздушных» оксидов азота. Однако сохраняется возможность образования «топливных» оксидов азота. Должна осуществляться очистка дымовых газов от серы, золы. Поток дымовых газов за котлом представляет собой практически чистый углекислый газ, содержание  $\text{CO}_2$  достигает 95 %. Заключительным этапом работ по охране атмосферного воздуха является захоронение  $\text{CO}_2$  в подземных хранилищах в пластах грунта на глубине 800 м и более. По такой технологии чистого сжигания угля (*oxufuel*) в 2008 г. построена опытная электростанция мощностью 30 МВт в Восточной Германии.

#### 5) Водородные технологии

Согласно сложившейся оценке водородная энергетика — развивающаяся отрасль энергетики, направление выработки и потребления энергии, основанное на использовании водорода в качестве средства для аккумулирования, транспортировки и потребления энергии [4]. Водород выбран как наиболее распространенный элемент на поверхности земли и в космосе, теплота сгорания водорода высока, а продуктом сгорания в кислороде является вода (которая вновь вводится в оборот водородной энергетике). Будущее водородной энергетике зависит от стоимости производства, транспортировки и хранения водорода. Соответствующие технологии находятся на стадии исследования и разработки, этот период ориентировочно оценивается в 25 лет, однако даже в более отдаленной перспективе они остаются слишком дорогими. Технологический недостаток водорода — его повышенная

взрывоопасность и проблемы хранения. Способами получения водорода являются:

- электролитический, когда водород получают при разложении воды на водород и кислород с помощью пропускаемого электрического тока; при этом производительность электролизных установок ограничена выходом водорода до  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  с  $1 \text{ м}^2$  поверхности электродов;
- паровая конверсия, данным способом производится примерно половина всего водорода. Водяной пар при температуре  $700\text{--}1000^\circ\text{C}$  смешивается с метаном под давлением в присутствии катализатора;
- плазмохимический, с технологией, основанной на создании электрического тока в ионизированном газе, находящемся в магнитном поле, когда химические реакции происходят в результате передачи энергии от «горячих» электронов молекулам газа;
- получение водорода из обратимых топливных элементов.
- газификация угля — старейший способ получения водорода.

Уголь нагревают с водяным паром при температуре  $800\text{--}1300^\circ\text{C}$  без доступа воздуха. Первый газогенератор был построен в Великобритании в 40-х гг. XIX в.

#### *6) Прямое преобразование энергии из органического топлива*

Анализ различных вариантов прямого преобразования потенциальной энергии топлива в электрическую энергию дал исчерпывающим образом акад. В. А. Кириллин. При этом он отмечает, что перспектива использования этих методов и устройств в большой энергетике пока еще до конца не ясна [5, 6].

##### *Термоэлектрогенераторы (ТЭГ)*

В электрической цепи, состоящей из различных элементов, при условии, что контакты (спаи) между ними имеют различную температуру, возникает электродвижущая сила. Этот эффект используется для измерения температуры с помощью электрической цепи, состоящей из двух проводников — меди и константана (сплава меди и никеля), один из спаев которых находится при температуре измеряемой среды, а другой при постоянной температуре, например при практически неизменной температуре смеси воды и льда (рис. 13.1). По величине электродвижущей силы, измеряемой гальванометром, можно с высокой степенью точности определить температуру рассматриваемой среды (по градуировочной кривой).

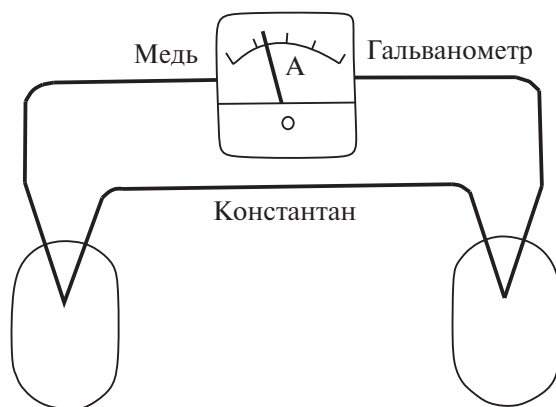


Рис. 13.1 Термоэлемент

Если составить электрическую цепь из последовательно соединенных отдельных термоэлементов, то получится термоэлектрический генератор. Создаваемая им электродвижущая сила будет пропорциональна числу термоэлементов. Таким образом, термоэлемент преобразует в электрическую энергию тепловую энергию. Следовательно, КПД термоэлемента регламентируется вторым законом термодинамики. Термоэлектрические генераторы пока еще дороги, а их КПД невелик. Поэтому они находят применение в качестве небольших, как правило, автономных, источников энергии.

#### *Термоэмиссионные преобразователи (ТЭП)*

Если какое-либо твердое тело (металл, полупроводник) поместить в вакуум, то известное количество электронов этого тела перейдет в вакуум. Это явление называется термоэлектронной эмиссией, а твердое тело, испускающее электроны, — эмиттером. Эмиссия электронов тем больше, чем выше температура эмиттера. В процессе эмиссии электронов эмиттер охлаждается. Через некоторое время после начала электронной эмиссии (после помещения тела в вакуум) установится равновесие: сколько электронов в единицу времени будет выходить из твердого тела за счет электронной эмиссии, столько же в него будет возвращаться в результате так называемой конденсации электронов. Охлаждения твердого тела в состоянии равновесия более не происходит.

Для организации термоэлектронной эмиссии необходимо поместить в вакуум два тела (два электрода), причем к одному из них (электроду-

эмиттеру) подводить тепло и поддерживать его при более высокой температуре, а от второго (электрода-коллектора) тепло отводить с тем, чтобы его температура оставалась более низкой. Если теперь эмиттер и коллектор замкнуть внешней электрической цепью, то по ней потечет ток. Это устройство станет источником тока, термоэмиссионным преобразователем (ТЭП). Из сказанного следует, что ТЭП (так же, как и ТЭГ) преобразует тепловую энергию в электрическую (минуя ступень механической энергии), подчиняясь ограничениям, установленным вторым законом термодинамики.

В настоящее время еще не достигнуты такие технико-экономические показатели ТЭП, которые могли бы удовлетворить энергетику. Однако работа по улучшению показателей ТЭП ведется высокими темпами.

#### *Топливные элементы*

В топливном элементе осуществляется прямое преобразование химической энергии в электрическую. Для этого пространственно разделяют реакцию преобразования водорода на два процесса, в одном из которых участвует водород, а в другом — кислород. Раздельное протекание процессов окисления и направленного движения электронов и ионов обеспечивают выработку электрического тока, происходит прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую в присутствии катализатора.

Схема топливного элемента представлена на рис. 13.2.

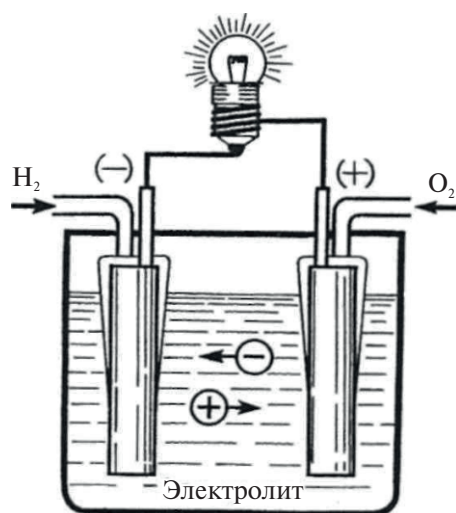


Рис. 13.2 Топливный элемент

Топливный элемент состоит из двух электродов, на один из которых подается водород, а на другой кислород, и электролита. Существенным отличием топливного элемента от электрического аккумулятора является то, что запас горючего и окислителя в топливном элементе, в данном случае водорода и кислорода, непрерывно пополняется. Водород, попадая на металлический электрод и находясь на разделе трех фаз — твердого электрода, электролита и газовой фазы, — переходит в атомарное состояние (его двухатомная молекула разделяется на атомы), а атомы делятся на свободные электроны и ядра атомов (ионы). Электроны уходят в металл, а ядра атомов — в раствор (электролит). Вследствие этого электрод насыщается отрицательно заряженными электронами, а электролит — положительно заряженными ионами.

Если соединить внешней цепью оба электрода, то возникнет электрический ток. Таким путем химическая энергия превращается в электрическую. Поскольку в топливном элементе отсутствует промежуточная стадия преобразования химической энергии в тепловую, его КПД не имеет ограничений, присущих тепловому двигателю. Водород-кислородный элемент работает при низкой температуре, а его КПД вполне может достигать 65–70 %. Удельная мощность топливных элементов во много раз больше, чем у электрических аккумуляторов. Топливный элемент «всеяден» и может работать при поступлении на анод любого водородосодержащего топлива (после соответствующей обработки) — природного газа, сжиженного газа, синтетического газа, биогаза, метанола, дизельного топлива, продуктов газификации угля. КПД достигает 70 %, а с учетом использования высокопотенциальной тепловой энергии — 90 %.

Идея топливного элемента появилась в середине XIX в., а конструкции для широкого применения нет и по сей день. Основные нерешенные проблемы: проведение всех процессов с большой скоростью (залог получения больших абсолютных и удельных мощностей); выбор материала и создание высококачественных электродов; создание высокоэффективных электролитов (жидких и твердых в зависимости от типа топливного элемента); возможность работы на дешевом топливе.

В настоящее время они используются в случаях, когда не требуется большой мощности, чаще всего как автономные источники. В космических аппаратах топливные элементы (водород-кис-



лородные) уже находят применение, что касается электромобилей, то здесь пока создаются опытные образцы. Можно предполагать, что топливные элементы в дальнейшем найдут применение и в большой энергетике. Успехи в разработке энергоустановок на основе топливных элементов, достигнутые за последние 15 лет, дали возможность рассматривать их как одну из перспективных основ энергетики будущего [7; 8].

### *7) Использование температурного градиента воды в океане*

Огромный объем электрической энергии можно извлекать из температурного режима водяной толщи океана — различие температуры теплой поверхности (25–28 °С) и ледяными глубинами (3–4 °С) в тропическом поясе планеты. В 1974 г. на Гавайях построена опытно-промышленная станция ОТЕС (Ocean Thermal Energy Conservation) мощностью 50 кВт, позволившая накопить опыт совершенствования технологии и эксплуатации подобных установок для крупномасштабных сооружений. Несмотря на то что КПД процесса не превышает 7 %, неограниченность энергетических ресурсов океана позволяет формировать мощный источник электроэнергии.

Сущность метода в полном соответствии с законами термодинамики заключается в использовании высокой температуры верхнего слоя океана (горячий источник) для генерации пара из легкокипящих жидкостей (аммиак, пропилен и другие). Под давлением 10 и более атмосфер эти вещества вскипают уже при 17–19 °С, получаемый пар (рабочее тело), расширяясь, способен вращать турбины. Вода, поступающая с глубины 600–1000 м, служит для конденсации отработанного пара (холодный источник).

Сегодня освоение тепловой энергии океана входит в национальные программы США, Франции, Японии, Швеции, Индии.

### *8) Нанотехнологии в энергетике*

Одной из ключевых областей использования нанотехнологий в энергетике будет являться создание аккумуляторных батарей нового поколения. Основные исследования в данной сфере сегодня сконцентрированы на решении задач повышения плотности энергетического потока, снижения продолжительности цикла зарядки батарей, уменьшения их габаритов и веса, а также повышения безопасности и стабильности работы. Стратегической задачей является разработка батарей высокой емкости, которые позволят обе-

спечить пробег электромобилей на длительные дистанции, а также смогут гарантировать более экономичные режимы работы возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи и ветроэнергетические установки, путем аккумулирования избытков энергии. Не менее перспективным направлением применения нанотехнологий в энергетике является создание суперконденсаторов, обладающих высокой электрической емкостью. Основными видами нанопродуктов, которые в ближайшей перспективе найдут широкое применение для изготовления наноконденсаторов, будут являться углеродные нанотрубки и нанопорошки.

Разработку топливных элементов в настоящее время нельзя представить без использования нанокomпонентов и нанотехнологий. Использование небольших добавок нанокomпонентов в электроды приводит к понижению слоев сопротивлений и увеличению электрохимической активности. Все это позволяет конструировать высокоэффективные энергосистемы для прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию.

Особые надежды специалисты связывают с массовым использованием нанопродуктов в сфере энергетики. Ожидается, что уже в ближайшей перспективе на энергетику будет приходиться порядка 13 % мирового потребления нанопродуктов, а в обозримом будущем разработки в сфере нанотехнологий помогут совершить революционный скачок в развитии технологий получения и преобразования энергии.

---

## **Литература к разделу 13**

---

1. Корчевой Ю. П., Майстренко А. Ю., Топал А. И. Экологически чистые угольные технологии. Киев : Наук. думка, 2004.
2. Производство беззольного угля — перспективное направление использования энергетических топлив / А. М. Осипов [и др.] // Угольная теплоэнергетика : проблемы реализации и развития : сб. Алушта, 2006.
3. Клер А. М., Тюрина Э. А. Получение продуктов глубокой переработки угля. Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева.

4. Кузин Б. Водородные технологии как стратегия инновационного прорыва в энергетике в XXI в. Научно-технологический Центр «ТАТА», 2007.
5. Кириллин В. А. Энергетика. Главные проблемы. М., 1990.
6. Щеклеин С. Е., Радченко Р. В. Электрохимические источники энергии. УрФУ, 2010.
7. Коровин. Н. В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. МЭИ, 2005.
8. Лялин Д. А., Ольховский Г. Г. Подходы к проектированию энергоустановок на основе твердоокисных топливных элементов // Электрические станции, 2006.

---

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ БАЗЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПОЧНОЙ ТЕХНИКИ В МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ .....	6
1.1. Развитие методов сжигания энергетического топлива в энергетике как непрерывный процесс .....	6
1.2. Формирование и развитие научной базы роста и совершенствования топочной техники в отечественной энергетике .....	12
1.3. Итоги развития отечественной топочной технологии и техники .....	16
Литература к разделу 1 .....	18
2. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА В ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ .....	20
2.1. Горение как комплекс различных процессов .....	20
2.2. Аэродинамические процессы формирования факела .....	23
2.2.1. Условия развития свободной турбулентной струи .....	23
2.2.2. Взаимодействие струи с потоками в топочной камере .....	26
2.2.3. Направленное формирование прямотруйного диффузионного факела .....	29
2.2.4. Особенности организации вихревого факела .....	30

2.2.5. Аэродинамическая характеристика турбулентного диффузионного факела.....	32
2.3. Интенсивность смешения потоков реагентов в диффузионном факеле как фактор скорости выгорания горючей смеси.....	33
2.3.1. Показатели эффективности смешения.....	33
2.3.2. Турбулизация потоков топливо-воздушной смеси как способ ускорения смесеобразования.....	34
2.4. Основные положения кинетики процессов горения энергетических топлив .....	35
2.4.1. Некоторые принципы химической термодинамики.....	35
2.4.2. Химические реакции горения гомогенной горючей смеси.....	36
2.4.3. Условия воспламенения и горения гетерогенных горючих смесей .....	44
2.5. Формирование теоретической базы подавления оксидов азота в топочных процессах.....	52
Литература к главе 2 .....	56

### 3. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОГО БАЛАНСА ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ КАК ВАЖНЕЙШЕГО ФАКТОРА РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....

3.1. Динамика структуры топливоснабжения ТЭС в отечественной энергетике и соответствующее развитие технологии сжигания энергетических топлив.....	59
3.1.1. Освоение торфа в процессе становления и развития отечественной энергетики .....	60
3.1.2. Начало отечественной угольной энергетики.....	60
3.1.3. Опыт перевода большой группы ТЭС на экибастузский уголь .....	61
3.1.4. Канско-Ачинские угли в энергетике .....	62
3.2. Газификация отрасли с вытеснением угля с ведущих позиций в топливном балансе ТЭС .....	63
3.3. Современные топливные ресурсы российской угольной энергетики.....	65
3.4. Перспективы потребления угля и условия снабжения углем российской энергетики .....	69
3.5. Газовые ресурсы российской энергетики .....	72

3.6. Влияние мировых топливных рынков на формирование топливного баланса российской энергетики .....	73
3.7. Использование мазута как энергетического топлива .....	75
3.8. Характеристика нефтекокса как энергетического топлива .....	76
3.9. Локальные энергетические ресурсы ТЭС .....	78
3.9.1. О значимости торфа как топлива для энергетики .....	78
3.9.2. Использование на ТЭС попутного нефтяного газа .....	80
3.9.3. Использование в качестве энергетического топлива шахтного метана .....	81
3.9.4. Угольный полукокс как энергетическое топливо .....	83
3.9.5. Биотопливо в энергетике .....	84
3.9.6. Возможности использования в энергетике твердых бытовых отходов и биогаза .....	85
3.10. Использование потенциальной физической энергии топливного газа перед сжиганием .....	86
Литература к разделу 3 .....	89
 4. КАЧЕСТВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ И ЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ .....	91
4.1. Качество углей, используемых в отечественной энергетике .....	91
4.2. Технологические и экологические характеристики энергетического топлива .....	93
4.2.1. Оценка технологических качеств угля .....	93
4.2.2. Показатели экологических качеств исходного угля .....	96
4.3. Совершенствование топлива, поставляемого на ТЭС .....	101
4.3.1. Стабилизация и направленное изменение качества угля усреднением и смешением углей .....	102
4.3.2. Обогащение углей деминерализацией на специализированных предприятиях .....	104
4.4. Организация подготовки топлива в рамках технологического цикла ТЭС .....	105
4.5. Подготовка высоковлажных топлив к сжиганию .....	106
4.5.1. Предварительная подсушка топлива топочными газами .....	107

4.5.2. Предварительная подсушка топлива с пылеконцентратором .....	110
4.5.3. Сброс сушильного агента в топку вне ядра топочного факела при наличии пылесистемы с промбункером и при прямом вдувании аэросмеси.....	112
4.6. Десульфуризация энергетических топлив непосредственно в рамках технологического процесса ТЭС.....	114
4.6.1. Десульфуризация мазута.....	114
4.6.2. Десульфуризация угольной пыли.....	115
4.7. Термохимическая обработка угля.....	116
4.8. Подготовка водоугольной суспензии водоугольного топлива для сжигания в топке энергетического котла .....	123
4.9. Оптимизация размолта твердого топлива по условиям воспламенения и выгорания .....	124
4.9.1. Производство угольной пыли грубого помола. Переход к технологиям сжигания, адаптированным к угольной пыли грубого помола .....	127
4.9.2. Микропомол угольной пыли. Перспективы его применения в энергетике .....	127
4.9.3. Оптимизация размера частиц угля по экологическим условиям .....	129
4.10. Подготовка мазута к сжиганию .....	130
4.11. Преобразование угля с получением новых топливных про- дуктов — газификация и пиролиз .....	132
4.11.1. Газификация угля как одно из направлений совершенствования угольной энергетики .....	132
4.11.2. Пиролиз угля в энергетике .....	137
Литература к разделу 4 .....	144
<b>5. ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ — НАПРАВЛЕННОЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА.....</b>	<b>147</b>
5.1. Основные параметры топочного процесса .....	147
5.2. Условия пребывания топлива в реакционной зоне в различных технологиях сжигания топлива .....	148
5.2.1. Сжигание топлива в плотном слое.....	148
5.2.2. Регулирование времени пребывания топливных частиц в реакционной зоне для кипящего слоя.....	149



5.2.3. Изменение условий пребывания топлива в реакционной зоне в ходе развития топочных факельных процессов сжиганием.....	150
5.2.4. Регулирование времени пребывания полидисперсной угольной пыли в реакционной зоне при факельном сжигании .....	151
5.2.5. Аэродинамические методы регулирования пребывания топлива в реакционной зоне .....	154
5.3. Формирование температурного режима в топке как фактора эффективности топочного процесса. Технологии высокотемпературного и низкотемпературного сжигания.....	159
5.4. Высокотемпературный режим сжигания низкорекционных углей .....	162
5.4.1. Топочные камеры с жидким шлакоудалением.....	162
5.4.2. Условия сжигания низкорекционных углей в высокотемпературной топке с жидким шлакоудалением.....	165
5.4.3. Ограничение выбросов загрязнителей при сжигании топлива в топках с жидким шлакоудалением .....	167
5.4.4. Использование циклонных предтопок для высокотемпературного сжигания малореакционных углей .....	168
5.5. Локальные высокотемпературные зоны в топке .....	171
5.6. Пути реализации низкотемпературных топочных технологий... ..	174
5.6.1. Условия сжигания низкорекционного топлива в вихревых топках.....	174
5.6.2. Технология низкотемпературного сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое.....	177
5.7. Технология сжигания тощих высокозольных углей в типовых топочных устройствах .....	182
5.8. Условия сжигания непроектного энергетического топлива на ТЭС.....	184
5.8.1. Проблемы приспособления действующих угольных и мазутных топочных устройств к использованию природного газа .....	185
5.8.2. Основные критерии, возможности и условия перехода пылеугольного котла на непроектное твердое топливо.....	186
5.8.3. Совместное сжигание различных топлив .....	189
5.8.4. Совместное сжигание природного газа и угольной пыли .....	190

5.8.5. Сжигание тощих углей с мазутом.....	190
5.9. Условия сжигания специально подготовленных топлив.....	191
5.9.1. Организация сжигания водоугольной суспензии.....	192
5.9.2. Сжигание высококонцентрированной аэросмеси .....	194
5.9.3. Организация сжигания угольного полукокса.....	196
5.10. Сжигание горючих побочных продуктов промышленного производства и добывающих отраслей .....	198
5.10.1. Организация сжигания нефтекокса в топках энергетических котлов .....	198
5.10.2. Особенности работы энергетических котлов на попутных нефтяных газах .....	201
5.10.3. Особенности использования в качестве энергетического топлива шахтного метана.....	202
5.10.4. Сжигание технологических газов металлургического производства .....	203
5.11. Использование на ТЭС возобновляемых источников энер- гии и горючих бытовых отходов.....	206
5.11.1. Технологии использования древесины и древесных отходов в энергетике .....	206
5.11.2. Сжигание твердых бытовых отходов для получения энергии .....	207
5.11.3. Организация сжигания биогаза, поступающего в виде свалочного газа.....	212
Литература к разделу 5 .....	213
<b>6. ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТОПОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>217</b>
6.1. Технологии «чистого» сжигания угля.....	217
6.2. Банк мероприятий по экологическому совершенствованию топочного процесса в энергетике.....	219
6.3. Организация внутритопочных процессов ограничения вредных выбросов.....	222
6.3.1. Нестехиометрическое сжигание .....	222
6.3.2. Ступенчатое сжигание .....	223
6.3.3. Ограничение образования оксидов азота при концентрическом сжигании .....	228
6.3.4. Пониженный общий избыток воздуха в топке.....	229

6.3.5. Пониженный температурный уровень топочного процесса.....	230
6.4. Восстановительные методы подавления оксидов азота .....	230
6.4.1. Трехступенчатое сжигание твердого топлива.....	230
6.4.2. Аммианирование дымовых газов .....	239
6.5. Оценка побочных эффектов реализации мероприятий экологического порядка .....	240
Литература к разделу 6 .....	242
<b>7. КОНСТРУКЦИИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ .....</b>	<b>244</b>
7.1. Характер развития топочной техники в отечественной энергетике .....	244
7.2. Слоевые топки со стационарным слоем .....	246
7.3. Топки с кипящим слоем .....	250
7.4. От слоевого к факельному сжиганию топлива.....	252
7.5. Дожигательные слоевые решетки в топках двухзонного сжигания .....	257
7.6. Основные конструктивные решения по котлам с циркулирующим кипящим слоем .....	259
7.7. Специфические условия факельного сжигания различных видов топлива в камерной топке.....	263
7.8. Конфигурация топочной камеры .....	266
7.8.1. Призматические топки .....	266
7.8.2. Конструктивные особенности призматической топки в котлах различной конструкции .....	269
7.8.3. Топки с криволинейной осью .....	274
7.9. Кольцевая топка.....	280
7.10. Зонирование топки .....	281
7.11. Основные параметры топочной камеры .....	284
Литература к разделу 7 .....	285
<b>8. КОМПОНОВКА ГОРЕЛОК КАК ФАКТОР ОРГАНИЗАЦИИ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА .....</b>	<b>287</b>
8.1. Основные используемые способы компоновки горелок.....	287
8.2. Настенная компоновка горелок.....	289
8.3. Угловое расположение горелок.....	291

8.4. Тангенциальная угловая компоновка прямооточных горелок.....	293
8.5. Топки с концентрическим сжиганием .....	295
8.6. Подовая компоновка горелок .....	296
8.7. Компоновка горелок в инвертных топках и конструктивные решения топки .....	299
8.8. Одноярусная и многоярусная компоновка горелок.....	299
Литература к разделу 8 .....	300

## 9. ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА КАК ФАКТОР ОРГАНИЗАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА.....

9.1. Динамика развития горелочных устройств.....	302
9.2. Общие требования к горелочным устройствам энергетических котлов .....	304
9.3. Классификация горелочных устройств энергетических котлов .....	306
9.4. Горелки с прямооточной аэродинамической структурой факела.....	308
9.4.1. Устройства для стабилизации факела прямооточных горелок.....	309
9.4.2. Способы смесеобразования в прямооточном горелочном устройстве .....	310
9.5. Вихревые горелки.....	321
9.6. Сравнительный анализ эффективности прямооточных и вихревых горелок .....	322
9.7. Прямоточно-вихревые горелки .....	323
9.8. Конструктивные способы совмещения в горелке прямооточных и вихревых принципов формирования факела.....	325
9.9. Конструктивные особенности подовых газомазутных прямооточно-вихревых горелок.....	327
9.10. Струйно-стабилизаторные горелки как сочетание прямооточной и вихревой структуры факела .....	329
9.11. Конструктивные особенности газогорелочных устройств .....	331

9.11.1. Основные типы газогорелочных устройств, применяемые в отрасли .....	331
9.11.2. Особенности формирования газового факела в энергетических котлах.....	332
9.11.3. Условия организации факела технологических газов .....	333
9.12. Конструктивные принципы пылеугольных горелок.....	335
9.13. Конструктивные принципы горелок, комбинированных по топливу .....	336
9.14. Экологически ориентированные конструкции горелок .....	337
9.14.1. Основные направления улучшения экологических показателей газогорелочных устройств.....	337
9.14.2. Пылеугольные вихревые горелки с замедленным смешением аэросмеси и вторичного воздуха.....	339
9.14.3. Переход от вихревых к прямоточно-вихревым горелкам.....	340
9.14.4. Горелки ступенчатого сжигания .....	341
9.14.5. Пространственное разделение потоков в горелках.....	350
9.14.6. Расщепление потока аэросмеси на выходе из горелки.....	352
9.14.7. Аэродинамические способы направленного воздействия на интенсивность смесеобразования .....	354
9.14.8. Управление скоростью химической реакции горения .....	354
9.14.9. Использование газов рециркуляции в горелке .....	355
9.14.10. Процессы восстановления $\text{NO}_x$ в факеле (режим трехступенчатого сжигания) .....	357
9.14.11. Комбинация конструктивных мероприятий для создания малотоксичных горелок.....	358
9.15. Горелки с регулируемым положением факела в топочной камере.....	358
9.16. Растопочные горелки .....	363
9.17. Надежность горелок .....	372
Литература к разделу 9 .....	376

<b>10. ТОПЛИВО- И ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕ ГОРЕЛОК КОТЛА .....</b>	<b>380</b>
10.1. Оптимизация системы воздухообеспечения горелок .....	380
10.2. Системы топливоснабжения горелок пылеугольного котла .....	384
10.2.1. Равномерность количественного распределения топлива по горелкам .....	386
10.2.2. Стабильность перемещения пыли по пылепроводам.....	387
10.3. Система транспорта высококонцентрированной аэросмеси .....	388
10.4. Совершенствование системы газоснабжения горелок газомазутного котла .....	394
10.5. Автоматизация систем газоснабжения .....	395
Литература к разделу 10 .....	404
<b>11. АЭРОДИНАМИКА ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ.....</b>	<b>407</b>
11.1. Основные факторы, определяющие структуру потоков в топочной камере .....	407
11.2. Прямоточные и вихревые аэродинамические структуры .....	408
11.3. Структура потока в вихревой топке с тангенциальным вводом топливо-воздушной смеси.....	409
11.4. Организация тангенциальной многосоставной вихревой горизонтальной аэродинамической структуры.....	412
11.5. Структура вихревого потока в топке при концентричном вводе аэросмеси и вторичного воздуха .....	412
11.6. Структура вертикального вихревого низкотемпературного течения в топке .....	414
11.6.1. Вихревые течения в зоне нижнего дутья.....	414
11.6.2. Вихревые течения в топках с низкотемпературным вихрем .....	416
11.7. Влияние отдельных конструктивных элементов топки на структуру потоков топочных газов .....	416
11.8. Роль отдельных начальных аэродинамических параметров факелов в формировании аэродинамики топочного пространства .....	417
11.8.1. Крютка потока на выходе из горелки.....	417

11.8.2. Влияние дальнотойности факела на аэродинамические свойства топочного процесса .....	418
11.8.3. Значение единичной мощности горелки для качества топочного процесса .....	418
11.9. Организация вводов в топку отдельных газо-воздушных потоков .....	419
11.9.1. Сброс части воздуха в топку помимо горелок.....	419
11.9.2. Организация нижнего дутья .....	421
11.9.3. Встречное дутье .....	421
11.9.4. Защитные воздушные завесы .....	423
11.9.5. Горячий воздух из системы охлаждения шлака при сухом конвейерном его отводе из топки .....	423
11.9.6. Плотность топочной камеры и ее обеспечение .....	424
11.10. Аэродинамические проблемы организации трехступенчатого сжигания.....	428
11.11. Забор дымовых газов из топки на пылесистему .....	431
Литература к разделу 11 .....	433
<b>12. УПРАВЛЕНИЕ ТОПОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ .....</b>	<b>435</b>
12.1. Объекты воздействия и инструменты, используемые оператором при регулировании топочного процесса .....	436
12.2. Рециркуляция дымовых газов как инструмент регулирования топочного процесса .....	437
12.2.1. Сфера применения газовой рециркуляции .....	437
12.2.2. Выравнивание температуры дымовых газов на выходе из топки .....	440
12.2.3. Газовое регулирование температуры перегретого пара .....	440
12.2.4. Ограничение процесса окисления азота воздуха.....	443
12.2.5. Использование рециркулирующих топочных газов для замены конструктивных узлов топки .....	448
12.3. Управление процессами шлакования.....	449
12.3.1. Значимость процессов шлакования в эксплуатации топки.....	449
12.3.2. Оценка механизмов шлакования пылеугольной топки.....	450
12.3.3. Способы направленного воздействия на процессы шлакования .....	452



12.4. Очистка поверхностей нагрева как фактор обеспечения бесшлаковочного топочного режима.....	456
12.4.1. Современные подходы к очистке поверхностей нагрева .....	456
12.4.2. Средства очистки поверхностей нагрева в топке.....	460
12.4.3. Современные аппараты паровой обдувки .....	461
12.5. Организация эвакуации золы и шлака из топки. Применение технологии сухого шлакоудаления.....	462
12.6. Развитие коррозионных процессов в топке — высокотемпературная окислительная и восстановительная коррозия и пути ее ограничения .....	466
Литература к разделу 12 .....	468
 <b>13. ИТОГИ И УРОКИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ XX В. ....</b>	
13.1. Анализ предшествующего опыта совершенствования топочной техники .....	471
13.2. Задачи специалистов-топочников на ближайшую перспективу.....	475
13.3. Отдаленные перспективы развития технологии энергопроизводства .....	476
13.4. Снижение выбросов парниковых газов.....	478
13.5. Перспективные разработки .....	479
Литература к разделу 13 .....	489



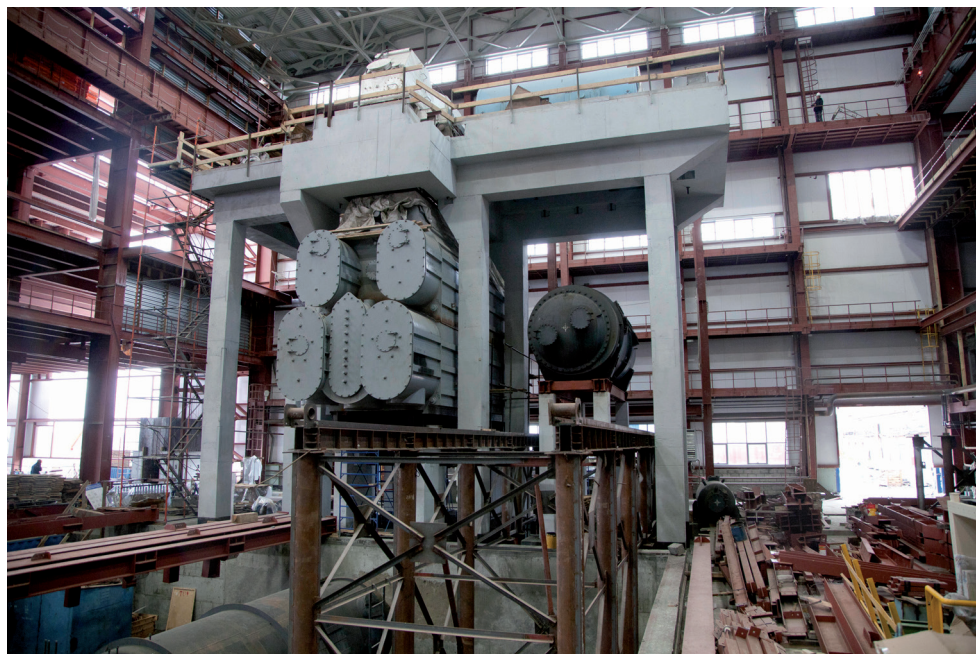
Вид на старое оборудование Нижнетуринской ГРЭС,  
планируемое к выводу из эксплуатации



Начало строительства двух новых блоков ПГУ Нижнетуринской ГРЭС



Котел-утилизатор Нижнетуринской ГРЭС изнутри



Фундамент паровой турбины и конденсатор на Нижнетуринской ГРЭС

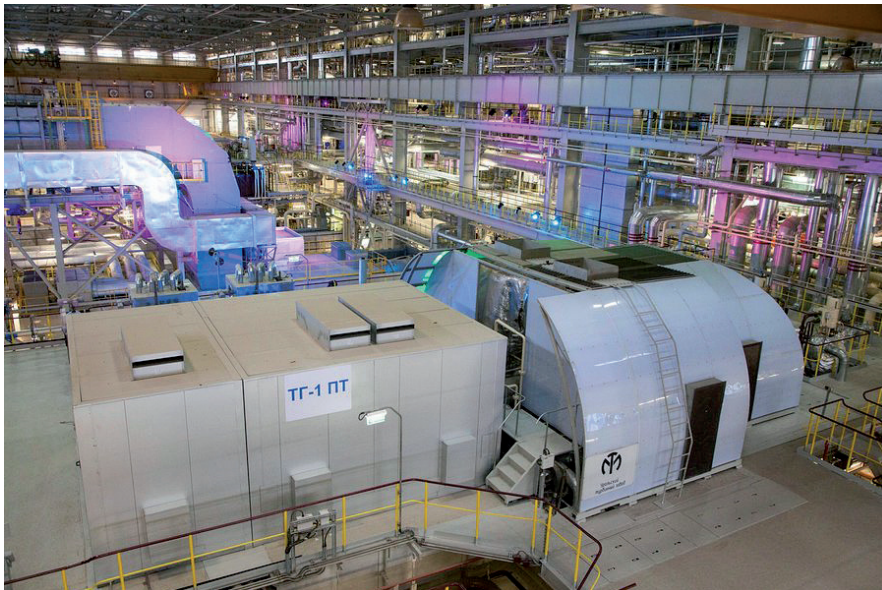




Газовая турбина и вход газов в котел-утилизатор  
на Нижнетуринской ГРЭС



Лопатки газовой турбины



Окончание строительства Нижнетуринской ГРЭС



Пуск Нижнетуринской ГРЭС в 2015 г.

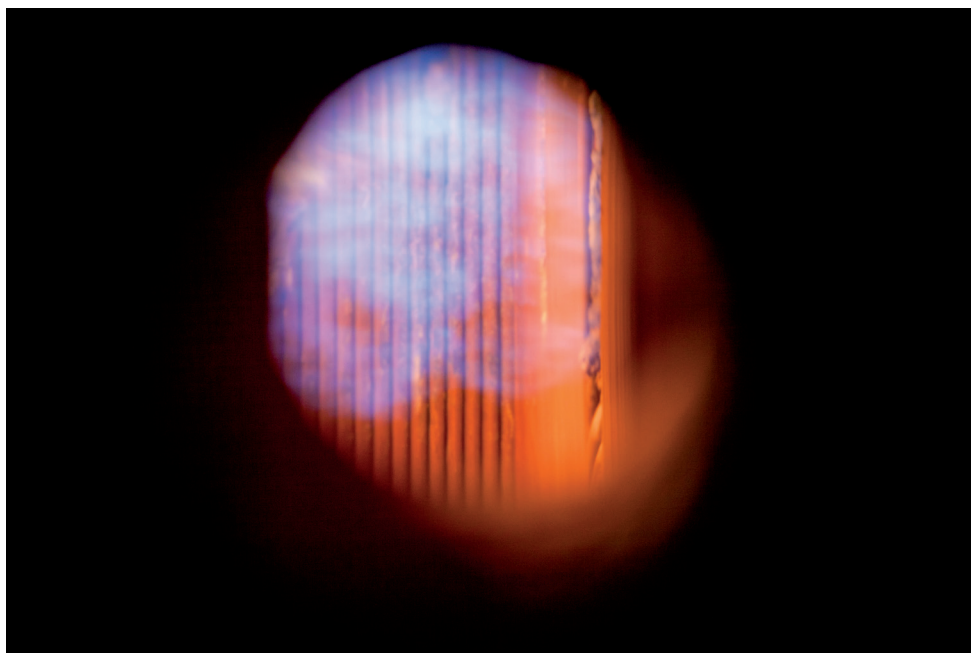




Котел-утилизатор на ТЭЦ «Академическая»

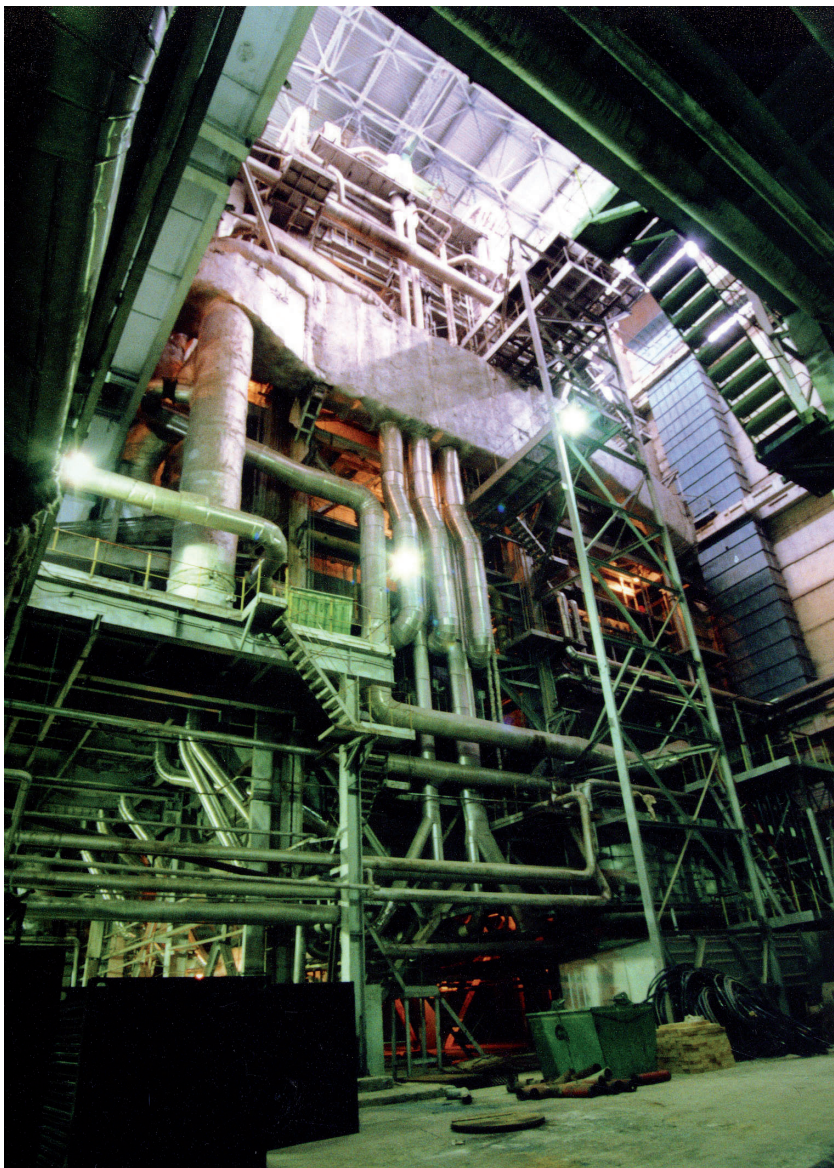


Строительство ТЭЦ «Академическая», г. Екатеринбург



Поверхности нагрева котла БКЗ-320-140 Ново-Свердловской ТЭЦ





Котел БКЗ-320-140 Ново-Свердловской ТЭЦ

*Выражаем благодарность филиалу «Свердловский» ПАО «Т Плюс» за предоставленные фотографии.*

*Учебное издание*

**Шульман** Владимир Львович

**Рыжков** Александр Филиппович

**Богатова** Татьяна Феокистовна

**Микула** Владимир Анатольевич

**Левин** Евгений Иосифович

**Осипов** Павел Валентинович

## РАЗВИТИЕ ТОПОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИЙСКОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Редактор *В. О. Корионова*

Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 07.09.2016. Формат 70×100 1/16.  
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 40,7.  
Уч.-изд. л. 28,0. Тираж 250 экз. Заказ 270.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru

*Для заметок*



